

**UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE CAMINOS,  
CANALES Y PUERTOS

---

---

**TESIS DOCTORAL**

**ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS OSCILATORIOS EN  
BAHÍAS NATURALES**

---

---

**Presentada por: PABLO AGUDELO RESTREPO**

**Dirigida por: RAÚL MEDINA SANTAMARÍA  
GABRIEL DÍAZ HERNÁNDEZ**

**Santander, 2014**





---

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero agradecer a Raúl Medina Santamaría por acogerme en lo que antes se llamaba GIOC. Sus sabias palabras siempre han sido, siempre lo son y siempre serán bien recibidas. /// De Fernando Méndez Incera siempre me sorprendió la forma en que es capaz de explicar de manera sencilla los temas más complicados. Mi agradecimiento hacia él se confunde con admiración. /// Gabo, Maitane y Verito tuvieron mucho que ver en el desarrollo de esta tesis. Gracias por su ayuda. /// Diana Álvarez merece también un agradecimiento especial /// Tengo que dar también un agradecimiento a Mao y a Andrés Osorio. Su apoyo siempre ha sido importantísimo en este proceso de aprendizaje. /// Esta tesis no habría sido posible sin la formación básica en ingeniería de puertos y costas. Siempre he coincidido con excelentes profesores, y en la Universidad de Cantabria no ha sido de otra forma. A César, Íñigo, Paco, Pedro, Sonia, a los profesores de Emisarios Submarinos y a los de la Autoridad Portuaria de Santander siempre los recordaré con aprecio. /// En Santander compartí estos años con muchísima gente buena. Sin su amistad hubiera sido imposible hacer algo. Lucho y Xime y Gabi, Guanche y Carmita, Toñito y Almudena, Marta y Jorge, Fer y La Peque, María y José, Hana y Oscarín, Ana y Omar, Lucía, Marianela, Paula, Javi Lara, Cynthia, Sole, Leo, Melisa, Inma, Teresa, Íñigo Cánovas, Rafa Mayor, Pino, Clarita, Susana, Jaime, Edu, Jurgui, Itziar, Marta y Germán. /// Un abrazo muy fuerte a Patri y a Pere. /// La permanente, eficaz y amable ayuda de Yolanda Pérez Hernando, Jesús Arriaga y María Isabel Falagán Ruamayor siempre será agradecida. Hasta de Carmen Marcos me acuerdo.

Todos ellos estuvieron presentes en el proceso de formación académica. De algún modo u otro me dieron sus consejos, su apoyo y su ayuda. No obstante, es mi familia quien me dio el soporte para empezar y terminar esto. Siempre me he sentido acompañado de mi mamá, mis hermanos y sus familias, mis abuelos, tíos y primos. En Titi, Ricky y Pipo son en quienes siempre pienso cuando estoy haciendo algún esfuerzo; su recuerdo me inspira a continuar las tareas cuando las veo difíciles, y a terminarlas siempre.

---

---

---

## **RESUMEN**

A diferencia del oleaje, la marea astronómica y los tsunamis, las ondas largas de origen meteorológico han sido poco estudiadas. Aunque las oscilaciones resonantes son un fenómeno conocido y bien documentado en gran número de ensenadas y puertos en todo el mundo, la génesis de muchas de estas ondas no se conoce bien y su influencia en la morfodinámica litoral mucho menos. Esta tesis desarrolla el análisis de la génesis de cierto tipo de ondas largas observadas en el Mar Mediterráneo, su comportamiento temporal y espacial, y la relación que existe con ciertas características hidrodinámicas y morfométricas de las zonas donde se propagan, características que generan una amplificación resonante, en particular en las bahías del delta del Ebro, Alfacs y Fangar.

Esa amplificación en una dársena es un problema que depende tanto de la geometría de la dársena como de la geometría de la onda incidente. También el tipo de mecanismo forzador difiere en cada caso, lo que hace que en el medio científico se observen con relativa frecuencia reportes de nuevos sitios donde se observan condiciones particulares. No obstante, en muy pocos sitios se ha hecho la identificación de los mecanismos forzadores, el análisis espacial y temporal del fenómeno, y las consecuencias morfodinámicas que genera. En esta tesis se han abordado esas tres fases.

Con el objeto de comprobar las observaciones realizadas en las bahías de Alfacs y Fangar, se ha efectuado un análisis de datos de nivel del mar en el interior de las mismas. Mediante el análisis de *Fourier* y *Wavelet* de los registros mareográficos de 1999, se han encontrado picos resonantes en las bahías de Alfacs y Fangar, específicamente en los mareógrafos de San Carles de la Ràpita y l'Ampolla. Ondas en los períodos de  $\sim 3.3$  h,  $\sim 1.5$  h,  $\sim 1.1$  h,  $\sim 0.7$  h y  $\sim 0.5$  h no son normales dentro del espectro de marea astronómica del Mediterráneo. La respuesta resonante de Alfacs ante la onda de  $\sim 3.3$  h se observa durante todo el año, aunque con períodos de mayor energía (DEF, MAM). Las ondas con períodos de  $\sim 1.1$  h y  $\sim 0.5$  h son de menor energía que la de  $T \sim 3.3$  h en Alfacs pero de mayor energía en Fangar; la respuesta resonante de ambas bahías ante estas ondas parece ser esporádica, aunque con una frecuencia de ocurrencia de entre 4 y 10 días.

Estas observaciones demuestran, al menos, una causalidad más de carácter regional que local, y cierta influencia estacional.

La amplitud de las oscilaciones observadas en San Carles de la Ràpita (Alfacs) y l'Ampolla (Fangar) es válida para el sitio de registro. Sin embargo, entre estos puntos y el interior de cada una de las bahías hay una distancia considerable. Por lo tanto, mediante modelación numérica tipo MSP en elementos finitos, se ha verificado el comportamiento espacial de las ondas resonantes para poder estimar los valores de la amplitud de las mismas en cualquier sitio de la bahía. Los resultados de dicha modelación numérica han demostrado que la energía observada en algunos picos de los espectros de las ondas de nivel del mar está asociada con la geometría de las bahías. En Alfacs y Fangar, los picos extraordinarios observados en los espectros de energía de los datos de nivel del mar registrados en los mareógrafos de las dos bahías ( $T \sim 3.3$  h,  $T \sim 1.5$  h,  $T \sim 1.1$  h,  $T \sim 0.7$  h y  $T \sim 0.5$  h) corresponden con diferentes períodos resonantes de las bahías según el nivel de referencia (bajamar, media marea o pleamar). Estas frecuencias se relacionan con los períodos de los *seiches*.

Hay varios mecanismos identificados en la literatura para la generación de *seiches*. Es común encontrar fenómenos de resonancia producidos por cualquiera de los siguientes forzadores: 1) Viento, 2) Presión atmosférica, 3) Ondas de borde y 4) Tsunamis. Cualquiera de ellos puede ser el mecanismo generador de los *seiches* observados en Alfacs y Fangar. Con el fin de observar si los diferentes fenómenos se convierten en mecanismos forzadores

---

de las *seiches* de las bahías de Alfacs y Fangar, identificados en las series de tiempo de nivel del mar, se ha hecho un análisis detallado de esos diferentes tipos de forzadores.

Los tsunamis son eventos esporádicos, no periódicos, con mucha energía generada en un momento determinado. Si bien, en teoría, los períodos de las ondas generadas por un tsunami en el mar Mediterráneo coinciden aproximadamente con los períodos de las ondas resonantes, observadas y verificadas numéricamente, de Alfacs y Fangar, la periodicidad del fenómeno resonante descrita anteriormente hace concluir que las ondas estudiadas y las consecuencias que ellas generan no sean precisamente de esa génesis sísmica. Por lo tanto, el análisis que se ha hecho se centra en los demás mecanismos forzadores: 1) Viento, 2) Presión atmosférica, 3) Ondas de borde.

El primer efecto directo producido en el océano por el esfuerzo del viento es la transferencia de energía hacia la superficie del agua. Como consecuencia de esto, se generan varios fenómenos. El más conocido y estudiado son las oscilaciones de corto período (oleaje) que tienen poca influencia en los *seiches*. En zonas semicerradas o bahías donde se observan rachas de viento en una misma dirección, el volumen de agua de dicha zona puede acumularse en el extremo interior mientras actúa el viento; si las rachas de viento son periódicas, se pueden generar ondas dentro de la bahía estrechamente relacionadas con las ondas de viento. Si la frecuencia de las rachas de viento coincide con ciertas características geométricas de la bahía, se pueden generar ondas resonantes dentro de la misma. Pero en Alfacs y Fangar esto no es lo que ocurre. Mediante el análisis de coherencia de señales entre la velocidad y dirección del viento y el nivel del mar, se ha comprobado que no existe ninguna relación en las frecuencias de interés. Es decir, ni la velocidad del viento, ni los vientos que soplan de ciertas direcciones, SO y NE para Alfacs y Fangar respectivamente, coinciden ni temporalmente ni en magnitud con el registro de esos eventos resonantes en ambas bahías. Los resultados encontrados sobre la influencia de la velocidad del viento en la amplificación resonante de las bahías de Alfacs y Fangar en las frecuencias de 3.3 h, 1.1 h y 0.5 h no han sido satisfactorios. La dirección del viento en el mismo sentido que el eje de las bahías parece que no es el mecanismo forzador de las *seiches* observadas. En relación con esto último, no existe dependencia temporal entre esa dirección y la ocurrencia de la sobreamplificación.

En cambio, se ha encontrado una relación directa entre las series de presión atmosférica en Alfacs y Fangar con los registros de nivel del mar en esos dos sitios. En la mayor parte de los eventos analizados existe una simultaneidad en las ondas de presión de 3.3 h, 1.1 h y 0.5 h, tanto en Alfacs como en Fangar. El fenómeno meteorológico que genera estas frecuencias parece ser el mismo. En ambos registros se observa una coincidencia entre estas ondas de presión atmosférica y las ondas de nivel del mar con igual período. Este comportamiento se aprecia más claramente cuando los episodios son más esporádicos (JAS) y muchísimo más marcado en las frecuencias de 1.1 h y 0.5 h. No obstante la coincidencia temporal la mayoría del tiempo, se pueden matizar un par de aspectos: 1) Hay momentos en los que la presencia de ondas de presión atmosférica en las frecuencias analizadas con bastante energía no genera respuesta resonante en las bahías. 2) Hay otros momentos en los que, existiendo un pulso de la onda de presión atmosférica, la onda de nivel del mar parece tardar más en generarse.

Para analizar espacialmente el fenómeno, y con el fin de continuar la evaluación de la influencia de la presión atmosférica en la generación de las ondas resonantes observadas en las bahías de Alfacs y Fangar, se han usado los valores medios diarios del reanálisis de presión atmosférica en superficie de SEAWIND-NCEP, entre 1948 y 2009, y cuya resolución espacial es de 0.5°, para construir los estados de tiempo atmosférico en la zona del Mediterráneo occidental. Se ha analizado particularmente los datos del año 1999, coincidente con los registros utilizados de los mareógrafos de las bahías de Alfacs y Fangar. Se ha demostrado, mediante la observación de los estados de tiempo atmosférico, que la dirección del gradiente de presión atmosférica influye en la magnitud de los eventos resonantes de las dos bahías analizadas. Cuando el campo de presión atmosférica se desplaza de forma paralela al eje de la plataforma continental entre Valencia y Barcelona, esta energía es mayor. Por el contrario, cuando esta dirección es perpendicular al eje de dicha plataforma, se generan los menores niveles de energía en los registros de nivel del mar de San Carles de la Rápita y l’Ampolla en las frecuencias resonantes.

La coincidencia temporal de las ondas tanto en Alfacs como en Fangar hace sospechar ese carácter regional, lo que implicaría necesariamente la existencia de un mecanismo intermedio entre los pulsos de presión atmosférica y las ondas resonantes dentro de las bahías. Es por esto que se ha modelado numéricamente con un modelo tipo MSP en elementos finitos y se ha hecho un análisis de datos de Valencia y Barcelona para identificar

---

la existencia de ondas de borde en la plataforma continental que existe entre esas dos ciudades. Con los resultados obtenidos se ha comprobado que existen unas ondas de borde en la plataforma continental entre Valencia y Barcelona de frecuencia igual ( $\sim 3.3$  h,  $\sim 1.1$  h y  $\sim 0.5$  h) a la de los modos propios de oscilación de las bahías de Alfacs y Fangar. Se observan también frecuencias en  $\sim 1.5$  h y  $\sim 0.7$  h, coincidiendo con otros modos identificados en estos sitios. Estos resultados también se observan en los registros de nivel del mar de Valencia. En los registros de nivel del mar en Barcelona, por el contrario, no se notan estos picos resonantes en los modos identificados, lo que permite concluir que, en efecto, el fenómeno observado en Alfacs y Fangar es de una génesis regional asociado a las características geométricas de la plataforma continental entre Valencia y Tarragona. En estas dos bahías se observa, simplemente, una amplificación resonante de esas ondas observadas en la plataforma.

Se ha construido, a partir de todos estos resultados, un modelo conceptual de comportamiento resonante en Alfacs y Fangar: 1) La onda de presión atmosférica genera ondas de borde en  $\sim 3.3$  h,  $\sim 1.1$  h y  $\sim 0.5$  en la plataforma continental Valencia-Tarragona. Estos períodos coinciden con los modos propios de oscilación de la misma plataforma. 2) Dichas ondas de borde generan una amplificación resonante en Alfacs y Fangar en las mismas frecuencias. 3) La magnitud de estos eventos resonantes es mayor cuando la dirección de la onda de presión atmosférica es paralela a la plataforma continental. 4) La velocidad de propagación de la onda de presión atmosférica también influye en la magnitud de los eventos resonantes.

Con el fin de verificar este modelo conceptual, se ha hecho una modelación en diferencias finitas con el modelo C3 (Cantabria – COMCOT – TsunamiCLAW). Con los resultados obtenidos, se ha verificado que la velocidad y dirección de propagación de la onda de presión atmosférica inciden en la amplificación de la onda de borde en la plataforma continental Valencia-Tarragona. Se ha comprobado, mediante modelación numérica, que son ciertas las hipótesis planteadas para la resonancia de las bahías de Alfacs y Fangar. Es decir: ondas atmosféricas propagándose paralelamente al eje longitudinal de la plataforma continental y a una velocidad de 50 m/s generan ondas de borde con períodos alrededor de  $\sim 3.3$  h. Estas ondas coinciden con los períodos propios de oscilación de dicha plataforma, así como con los modos principales de las bahías Alfacs y Fangar.

---

Habiendo demostrado que la onda de presión atmosférica es el mecanismo forzador de ondas de borde en la plataforma continental entre Valencia y Tarragona, que coinciden con el período propio de oscilación de las bahías de Alfacs y Fangar, cabe preguntarse si la forma de esas bahías es influenciada por dichas ondas. Aunque la mayoría de las investigaciones en este campo se limitan a la escala de las playas, cuyo formador es el oleaje, es de esperar que otras ondas también tengan influencia en la respuesta morfodinámica de las costas; de hecho, ya se ha estudiado el papel de las mareas en la formación de los *beach-cusps*. Es decir, observando las características morfométricas de las bahías analizadas, Alfacs y Fangar, así como la composición no cohesiva de sus suelos, se hace necesario determinar si estas geoformas se generaron o mantienen estas dimensiones por la existencia de las ondas de plataforma identificadas. Para ello, se ha hecho un análisis de siete bahías naturales no antropizadas, localizadas en el Mediterráneo y se han comparado los modos propios de oscilación de las bahías y de las plataformas continentales en las que se encuentran localizadas. Se ha encontrado que existe una coincidencia entre el modo propio de oscilación de ciertas plataformas continentales y el de las bahías que están localizadas en ellas. Esa pura coincidencia parece indicar, más bien, que el período resonante de esas zonas semicerradas está relacionado con el período resonante exterior, lo que hace concluir que probablemente la forma de las bahías esté siendo condicionada por la hidrodinámica de las ondas de borde que existen en la plataforma continental.



# **ÍNDICE**

## Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

1.1. Generalidades	1.1
1.2. Ondas largas, <i>seiches</i> y resonancia	1.3
1.3. <i>Seiches</i> en el Mediterráneo español	1.5
1.4. Importancia de las bahías naturales	1.8
1.4.1. <i>Importancia ecológica</i>	1.8
1.4.2. <i>Importancia geomorfológica</i>	1.12
1.4.3. <i>Importancia económica</i>	1.15
1.5. Interés investigativo	1.17
1.6. Estructura del documento	1.17

## Capítulo 2. ESTADO DEL CONOCIMIENTO Y REVISIÓN DE OTROS ESTUDIOS

2.1. Introducción	2.1
2.2. Estado del conocimiento y revisión de otros estudios	2.2

2.2.1. <i>De la forma de resolver el problema</i>	2.3
2.2.2. <i>De los mecanismos forzadores</i>	2.11
2.2.3. <i>De los estudios en otras zonas del mundo</i>	2.15
2.3. Conclusiones	2.19

### Capítulo 3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA, OBJETIVOS Y ESTRUCTURA

3.1. Planteamiento del problema	3.1
3.2. Objetivos de la tesis	3.3
3.2.1. <i>Objetivo general</i>	3.3
3.2.2. <i>Objetivos específicos</i>	3.4
3.3. Estructura de la tesis	3.5
3.3.1. <i>Objetivo 1: Conocer el comportamiento espacio-temporal e identificar los mecanismos forzadores de las ondas resonantes en las bahías de Alfacs y Fangar, para lo cual es tan necesario analizar los datos nivel del mar como modelar numéricamente el fenómeno</i>	3.5
3.3.2. <i>Objetivo 2: Determinar el comportamiento espacio-temporal de los mecanismos forzadores de las ondas resonantes de las bahías analizadas, sean atmosféricos o de plataforma, o ambos</i>	3.7
3.3.3. <i>Objetivo 3: Ampliar el conocimiento de las seiches en relación con las consecuencias morfológicas que puedan generar</i>	3.8

### Capítulo 4: ANÁLISIS DE DATOS DE NIVEL DEL MAR EN ALFACS Y FANGAR

4.1. Introducción	4.1
4.2. Análisis general del comportamiento del nivel del mar en el mar Balear	4.3
4.3. Descripción de los datos de nivel del mar en Alfacs y Fangar	4.7
4.4. Análisis espectral del nivel del mar en las bahías de Alfacs y Fangar	4.12
4.5. Análisis de la evolución temporal de la energía (análisis <i>wavelet</i> ) de nivel del mar en Alfacs y Fangar	4.16

---

4.5.1. <i>Teoría</i>	4.16
4.5.2. <i>Análisis de datos</i>	4.19
4.6. Conclusiones	4.29

## Capítulo 5: MODELACIÓN NUMÉRICA DE LA RESONANCIA EN ALFACS Y FANGAR

5.1. Introducción	5.1
5.2. Importancia de la modelación numérica y selección del modelo a utilizar	5.2
5.3. Descripción del modelo numérico empleado	5.4
5.3.1. <i>Batimetrías</i>	5.4
5.3.2. <i>Mallas de propagación</i>	5.7
5.4. Resultados	5.9
5.4.1. <i>Modos resonantes</i>	5.10
5.4.2. <i>Comportamiento espacial de los modos resonantes</i>	5.15
5.5. Conclusiones	5.19

## Capítulo 6: ANÁLISIS DE LOS POSIBLES MECANISMOS FORZADORES: VIENTO

6.1. Introducción	6.1
6.2. El viento en el mar Mediterráneo	6.3
6.2.1. <i>Meteorología sinóptica y de mesoescala relacionada con el clima de la Península Ibérica</i>	6.3
6.2.2. <i>Comportamiento del viento en la zona Mediterránea</i>	6.6
6.3. Posible relación entre el viento y las <i>seiches</i> de Alfacs y Fangar	6.9
6.4. Velocidad del viento en Alfacs y Fangar	6.11
6.4.1. <i>Estaciones de registro</i>	6.11
6.4.2. <i>Series de tiempo de velocidad del viento en Alfacs y Fangar</i>	6.13
6.5. Análisis espectral de la velocidad del viento en las bahías de Alfacs y Fangar	6.15

---

6.6. Análisis conjunto de la velocidad y la dirección del viento en las bahías de Alfacs y Fangar	6.18
6.7. Conclusiones	6.26

## Capítulo 7: ANÁLISIS DE LOS POSIBLES MECANISMOS FORZADORES: PRESIÓN ATMOSFÉRICA. ANÁLISIS TEMPORAL

7.1. Introducción	7.1
7.2. Posible relación entre los campos de presión atmosférica y las <i>seiches</i> de Alfacs y Fangar	7.2
7.3. Comportamiento de la presión atmosférica en la zona Mediterránea	7.5
7.4. Presión atmosférica en Alfacs y Fangar	7.9
7.4.1. <i>Estaciones de registro</i>	7.9
7.4.2. <i>Series de tiempo de presión atmosférica en Alfacs y Fangar</i>	7.9
7.5. Análisis espectral de la presión atmosférica en Alfacs y Fangar	7.12
7.6. Análisis temporal de la presión atmosférica en Alfacs y Fangar	7.14
7.7. Análisis de las diferencias de fase entre la presión atmosférica y el nivel del mar en Alfacs y Fangar	7.21
7.8. Conclusiones	7.23

## Capítulo 8: ANÁLISIS DE LOS POSIBLES MECANISMOS FORZADORES: PRESIÓN ATMOSFÉRICA. ANÁLISIS ESPACIAL

8.1. Introducción	8.1
8.2. Descripción de los datos	8.3
8.3. Modelo meteorológico conceptual utilizado para explicar la generación de <i>seiches</i> en la costa catalana	8.3
8.4. Análisis espacial de la presión atmosférica en Alfacs y Fangar mediante técnicas de clasificación y selección de estados climáticos a partir de datos de reanálisis	8.5

---

8.4.1. <i>Técnicas de clasificación y selección de datos. Técnica K-medias (K-means)</i>	8.6
8.4.2. <i>Resultados</i>	8.9
8.5. Conclusiones	8.23

## Capítulo 9: ANÁLISIS DE LOS POSIBLES MECANISMOS FORZADORES: ONDAS DE BORDE

9.1. Introducción	9.1
9.2. Relación entre ondas de borde y la amplificación resonante en Alfacs y Fangar	9.2
9.3. Ondas de borde como mecanismo intermedio entre la perturbación atmosférica y la resonancia en Alfacs y Fangar. Hipótesis	9.4
9.4. Descripción de los datos	9.5
9.5. Modelación numérica de las ondas de borde	9.8
9.5.1. <i>Descripción del modelo numérico empleado</i>	9.9
9.5.2. <i>Batimetría y malla de propagación</i>	9.9
9.5.3. <i>Resultados</i>	9.12
9.6. Análisis de datos de nivel del mar en Barcelona y Valencia	9.15
9.7. Conclusiones	9.17

## Capítulo 10: SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA PRESIÓN ATMOSFÉRICA COMO MECANISMO GENERADOR DE LA RESPUESTA RESONANTE EN ALFACS Y FANGAR

10.1. Introducción	10.1
10.2. Modelo general del comportamiento resonante en Alfacs y Fangar	10.2
10.3. Modelación numérica de la superficie libre mediante pulsos de presión atmosférica	10.3
10.3.1. <i>Descripción del modelo numérico empleado</i>	10.4

---

<i>10.3.2. Batimetrías y mallas de generación</i>	<i>10.9</i>
<i>10.3.3. Series de datos</i>	<i>10.10</i>
<i>10.3.4. Casos de análisis</i>	<i>10.10</i>
<i>10.3.5. Resultados</i>	<i>10.11</i>
10.4. Conclusiones	10.24

## Capítulo 11: CONSECUENCIAS MORFODINÁMICAS DE LAS ONDAS RESONANTES

11.1. Introducción	11.1
11.2. Sitios de análisis	11.2
<i>11.2.1. Localización y descripción general de los sitios de análisis</i>	<i>11.2</i>
<i>11.2.2. Resumen morfométrico de los sitios de análisis</i>	<i>11.8</i>
11.3. Comparación de los períodos resonantes en las bahías y de la plataforma continental	11.9
11.4. Conclusiones	11.11

## Capítulo 12: CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

12.1. Conclusiones	12.1
12.2. Futuras líneas de investigación	12.3

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Escala espacio-temporal de las ondas en el océano	1.2
Figura 1.2	Localización de sitios de observación de <i>seiches</i>	1.5
Figura 1.3	Efectos de las <i>rissagues</i> en el puerto de Ciutadella	1.6
Figura 1.4	Localización de la zona estudiada	1.7
Figura 1.5	Localización zonas protegidas en el Delta del Ebro	1.11
Figura 1.6	Principales bahías naturales y lagunas costeras asociadas en el Mediterráneo, en relación con la disponibilidad de datos hidrográficos, geomorfológicos y ecológicos	1.12
Figura 1.7	Imágenes de los ríos Ródano y Po	1.13
Figura 1.8	Clasificación de Deltas según Galloway (1975)	1.13
Figura 1.9	Evolución morfológica de los deltas del (a) Ebro y (b) Ródano	1.14
Figura 1.10	Evolución morfológica del Delta del Po	1.14
Figura 1.11	Zonas de interés económico en las bahías del delta del Ebro	1.16
Figura 1.12	Puerto de Saint Louis du Rhône, Golfo de Fos (Francia)	1.16
Figura 0.13	Esquema utilizado por Lee (1971) para el planteamiento del estudio analítico de la resonancia portuaria	2.7
Figura 0.14	Oscilación de onda larga en un canal de longitud L	4.2
Figura 0.15	Localización y batimetría del mar Mediterráneo español	4.4
Figura 0.16	Amplitudes medias de marea en el mar Balear	4.5
Figura 0.17	Armónicos de marea en Valencia	4.6
Figura 0.18	Localización y características de los mareógrafos de San Carles de la Ràpita y l'Ampolla	4.8
Figura 0.19	Serie de nivel del mar en San Carles de la Ràpita en 1999	4.9
Figura 0.20	Serie de nivel del mar en l'Ampolla en 1999	4.9
Figura 0.21	Régimen de probabilidad del nivel del mar en (a) San Carles de la Ràpita y (b) l'Ampolla en 1999	4.10
Figura 0.22	Espectro de Fourier de la serie de nivel del mar de 1999 en San Carles de la Ràpita, bahía de Alfacs	4.13

---

Figura 0.23 Espectro de Fourier de las series mensuales de nivel del mar de 1999 en San Carles de la Ràpita, bahía de Alfacs	4.14
Figura 0.24 Espectro de Fourier de la serie de nivel del mar de 1999 en l’Ampolla, bahía de Fangar	4.14
Figura 0.25 Espectro de Fourier de las series mensuales de nivel del mar de 1999 en l’Ampolla, bahía de Fangar	4.15
Figura 0.26 Variación temporal de la energía en los modos resonantes durante el mes de MAYO de 1999 en San Carles de la Ràpita, bahía de Alfacs	4.20
Figura 0.27 Variación temporal de la energía en los modos resonantes durante el mes de AGOSTO de 1999 en San Carles de la Ràpita, bahía de Alfacs	4.21
Figura 0.28 Variación temporal de la energía en los modos resonantes durante el mes de DICIEMBRE de 1999 en San Carles de la Ràpita, bahía de Alfacs	4.21
Figura 0.29 Variación mensual de la energía en los modos resonantes durante los meses de 1999 en Alfacs	4.23
Figura 0.30 Variación temporal de la energía en los modos resonantes durante el mes de MAYO de 1999 en l’Ampolla, bahía de Fangar	4.24
Figura 0.31 Variación temporal de la energía en los modos resonantes durante el mes de AGOSTO de 1999 en l’Ampolla, bahía de Fangar	4.25
Figura 0.32 Variación temporal de la energía en los modos resonantes durante el mes de DICIEMBRE de 1999 en l’Ampolla	4.26
Figura 0.33 Variación mensual de la energía en los modos resonantes durante los meses de 1999 en l’Ampolla, bahía de Fangar	4.28
Figura 0.34 Batimetría de detalle de la bahía de Alfacs	5.5
Figura 0.35 Batimetría de detalle de la bahía de Fangar	5.5
Figura 0.36 Cartas náuticas de la costa mediterránea norte española del Instituto Hidrográfico de la Marina	5.6
Figura 0.37 Malla de propagación y puntos de análisis en la bahía de Alfacs	5.8
Figura 0.38 Malla de propagación y puntos de análisis en la bahía de Fangar	5.9
Figura 0.39 Coeficiente de amplificación adimensionalizado Alfacs. Bajamar	5.11
Figura 0.40 Coef. de amplificación adimensionalizado Alfacs. Media marea	5.11
Figura 0.41 Coef. de amplificación adimensionalizado Alfacs. Pleamar	5.12
Figura 0.42 Coef. de amplificación adimensionalizado Fangar. Bajamar	5.12

---

Figura 0.43	Coef. de amplificación adimensionalizado Fangar. Media marea	5.13
Figura 0.44	Coef. de amplificación adimensionalizado Fangar. Pleamar	5.13
Figura 0.45	Isoalturas de onda adimensionalizada con la máxima altura de onda en Alfacs. Bajamar. (a) $T = 3.6$ h y (b) $T = 1.2$ h.	5.15
Figura 0.46	Isoalturas de onda adimensionalizada con la máxima altura de onda en Alfacs. Media marea. (a) $T = 3.3$ h y (b) $T = 1.1$ h.	5.15
Figura 0.47	Isoalturas de onda adimensionalizada con la máxima altura de onda en Alfacs. Pleamar. (a) $T = 3.1$ h y (b) $T = 1.1$ h.	5.16
Figura 0.48	Isoalturas de onda adimensionalizada con la máxima altura de onda en l'Ampolla. Bajamar. (a) $T = 1.5$ h y (b) $T = 0.7$ h.	5.16
Figura 0.49	Isoalturas de onda adimensionalizada con la máxima altura de onda en l'Ampolla. Media marea. (a) $T = 1.0$ h y (b) $T = 0.5$ h.	5.16
Figura 0.50	Isoalturas de onda adimensionalizada con la máxima altura de onda en l'Ampolla. Pleamar. (a) $T = 0.9$ h y (b) $T = 0.4$ h.	5.17
Figura 0.51	Masas de aire que llegan a la Península Ibérica	6.4
Figura 0.52	Esquema de las fases de la NAO. a) Fase positiva, b) Fase negativa	6.5
Figura 0.53	Esquema de las fases del WeMOi. a) Fase positiva, b) Fase negativa	6.6
Figura 0.54	Relieve de la Península Ibérica	6.7
Figura 0.55	Mapa de isobaras en superficie (hPa) y dirección del viento promedio multianual	6.8
Figura 0.56	Mapa de isobaras en superficie (hPa) y dirección del viento promedio multianual, en a) enero y b) julio	6.9
Figura 0.57	Localización y características de las estaciones meteorológicas de San Carlos de la Ràpita y l'Ampolla	6.12
Figura 0.58	Variación temporal de la velocidad del viento y rosa de vientos en San Carles de la Ràpita, bahía de Alfacs	6.13
Figura 0.59	Variación temporal de la velocidad del viento y rosa de vientos en l'Ampolla, bahía de Fangar	6.13
Figura 0.60	Variabilidad mensual del WeMOi	6.14
Figura 0.61	Espectro de Fourier de las series de velocidad del viento y nivel del mar durante 1999 en San Carles de la Ràpita, bahía de Alfacs	6.16

---

Figura 0.62 Espectro de Fourier de las series de velocidad del viento y nivel del mar durante 1999 en l' Ampolla, bahía de Fangar	6.17
Figura 0.63 Coherencia de señales de velocidad del viento y nivel del mar durante 1999 en a) Alfacs y b) Fangar	6.17
Figura 0.64 Esquema de la hipótesis que considera velocidad y dirección del viento como mecanismos forzadores de la amplificación resonante en Alfacs y Fangar	6.19
Figura 0.65 Variación temporal de la energía en los modos resonantes durante MAYO de 1999 en Alfacs. Nivel del mar (SL) e Índice de viento Alfacs	6.20
Figura 0.66 Variación temporal de la energía en los modos resonantes durante AGOSTO de 1999 en Alfacs. Nivel del mar (SL) e Índice de viento Alfacs	6.21
Figura 0.67 Variación temporal de la energía en los modos resonantes durante DICIEMBRE de 1999 en Alfacs. Nivel del mar e Índice de viento Alfacs	6.22
Figura 0.68 Variación temporal de la energía en los modos resonantes durante MAYO de 1999 en Fangar. Nivel del mar e Índice de viento Fangar	6.23
Figura 0.69 Variación temporal de la energía en los modos resonantes durante AGOSTO de 1999 en Fangar. Nivel del mar e Índice de viento Fangar	6.24
Figura 0.70 Variación temporal de la energía en los modos resonantes durante DICIEMBRE de 1999 en Fangar. Nivel del mar e Índice de viento Fangar	6.25
Figura 0.71 Centros de acción climática de la Península Ibérica	7.8
Figura 0.72 Variación temporal de presión atmosférica en San Carles de la Ràpita, bahía de Alfacs	7.10
Figura 0.73 Variación temporal de presión atmosférica en l' Ampolla, bahía de Fangar	7.10
Figura 0.74 Espectro de Fourier de las series de presión atmosférica y nivel del mar durante 1999 en San Carles de la Ràpita, bahía de Alfacs	7.12
Figura 0.75 Espectro de Fourier de las series de presión atmosférica y nivel del mar durante 1999 en l' Ampolla, bahía de Fangar	7.13
Figura 0.76 Coherencia de señales de presión atmosférica y nivel del mar durante 1999 en a) San Carles de la Ràpita, Alfacs y b) l' Ampolla, Fangar	7.13
Figura 0.77 Variación temporal de la energía en los modos resonantes durante MAYO de 1999 en Alfacs. Nivel del mar (SL) y presión atmosférica (PSL)	7.15

---

Figura 0.78 Variación temporal de la energía en los modos resonantes durante AGOSTO de 1999 en Alfacs. Nivel del mar (SL) y presión atmosférica (PSL)	7.16
Figura 0.79 Variación temporal de la energía en los modos resonantes durante DICIEMBRE de 1999 en Alfacs. Nivel del mar (SL) y presión atmosférica (PSL)	7.17
Figura 0.80 Variación temporal de la energía en los modos resonantes durante MAYO de 1999 en Fangar. Nivel del mar (SL) y presión atmosférica (PSL)	7.18
Figura 0.81 Variación temporal de la energía en los modos resonantes durante AGOSTO de 1999 en Fangar. Nivel del mar (SL) y presión atmosférica (PSL)	7.19
Figura 0.82 Variación temporal de la energía en los modos resonantes durante DICIEMBRE de 1999 en Fangar. Nivel del mar (SL) y presión atmosférica (PSL)	7.20
Figura 0.83 Espectro de diferencias de fase entre las series de presión atmosférica y nivel del mar en Alfacs	7.21
Figura 0.84 Espectro de diferencias de fase entre las series de presión atmosférica y nivel del mar en Fangar	7.22
Figura 0.85 Aplicación de K-Medias: a) Inicialización de los centroides (círculos) y definición de los mismos después de la primera iteración (puntos), b) Centroides y subconjuntos finales. Tomada de Camus (2009)	8.8
Figura 0.86 Estados de anomalías de presión atmosférica sobre el Mediterráneo occidental clasificadas en 100 diferentes estados mediante la técnica de <i>K-medias</i>	8.10
Figura 0.87 Esquema de dirección del gradiente de anomalía de presión atmosférica en el Mediterráneo occidental. (a) Gradiente paralelo a la línea de costa, (b) Gradiente perpendicular a la línea de costa	8.11
Figura 0.88 Clasificación de los estados de anomalías de presión atmosférica sobre el Mediterráneo occidental mediante la dirección principal de su gradiente	8.11
Figura 0.89 Umbrales resonantes en (a) San Carles de la Ràpita (bahía de Alfacs) y (b) l’Ampolla (bahía de Fangar). Datos de 1999	8.12
Figura 0.90 Probabilidad de ocurrencia de eventos resonantes en cada estado de tiempo atmosférico. Bahía de Alfacs	8.13
Figura 0.91 Probabilidad de ocurrencia de eventos resonantes en cada estado de tiempo atmosférico. Bahía de Fangar	8.14
Figura 0.92 Comparación gráfica entre (a) la dirección y (b) la probabilidad de ocurrencia de eventos resonantes, en los diferentes estados de tiempo atmosférico	8.15

---

Figura 0.93 Evolución temporal de los estados de las anomalías de presión atmosférica sobre el Mediterráneo occidental durante el Evento 1 (01/05/99 - 08/05/99)	8.18
Figura 0.94 Evolución temporal de los estados de las anomalías de presión atmosférica sobre el Mediterráneo occidental durante el Evento 2 (11/05/99 - 18/05/99)	8.18
Figura 0.95 Evolución temporal de los estados de las anomalías de presión atmosférica sobre el Mediterráneo occidental durante el Evento 3 (23/05/99 - 30/05/99)	8.19
Figura 0.96 Evolución temporal de los estados de las anomalías de presión atmosférica sobre el Mediterráneo occidental durante el Evento 4 (15/08/99 - 22/08/99)	8.20
Figura 0.97 Evolución temporal de los estados de las anomalías de presión atmosférica sobre el Mediterráneo occidental durante el Evento 5 (07/12/99 - 22/12/99)	8.22
Figura 0.98 Evolución temporal de los estados de las anomalías de presión atmosférica sobre el Mediterráneo occidental durante el Evento 6 (23/12/99 - 30/12/99)	8.23
Figura 0.99 Localización de la red de mareógrafos de Puertos del Estado	9.6
Figura 0.100 Serie de nivel del mar en Barcelona en 1999	9.6
Figura 0.101 Régimen de probabilidad del nivel del mar en Barcelona en 1999	9.7
Figura 0.102 Serie de nivel del mar en Valencia en 1999	9.8
Figura 0.103 Régimen de probabilidad del nivel del mar en Valencia en 1999	9.8
Figura 0.104 Batimetría general del Mar Balear	9.10
Figura 0.105 Malla de propagación y puntos de análisis en la plataforma continental entre Valencia y Barcelona	9.12
Figura 0.106 Coeficiente de amplificación adimensionalizado en la plataforma continental Valencia-Barcelona. Media marea	9.14
Figura 0.107 Espectro de Fourier de la serie de nivel del mar de 1999 en Valencia	9.16
Figura 0.108 Espectro de Fourier de la serie de nivel del mar de 1999 en Barcelona	9.16
Figura 0.109 Batimetría general del Mediterráneo	10.9
Figura 0.2 Serie de presión atmosférica en San Carles de la Ràpita entre 20/12/99 y el 24/12/99	10.10
Figura 0.110 Evolución de la superficie del mar entre t=180min y t= 340min de ejecución. Velocidad de la onda: 20m/s. Dirección de la onda: 45°	10.13
Figura 0.111 Evolución de la superficie del mar entre t=360min y t=500min de ejecución. Velocidad de la onda: 20m/s. Dirección de la onda: 45°	10.14

---

Figura 0.112 Evolución de la superficie del mar entre $t=180\text{min}$ y $t=340\text{min}$ de ejecución. Velocidad de la onda: 50m/s. Dirección de la onda: $45^\circ$	10.15
Figura 0.113 Evolución de la superficie del mar entre $t=360\text{min}$ y $t=500\text{min}$ de ejecución. Velocidad de la onda: 50m/s. Dirección de la onda: $45^\circ$	10.16
Figura 0.114 Evolución de la superficie del mar entre $t=180\text{min}$ y $t=340\text{min}$ de ejecución. Velocidad de la onda: 30m/s. Dirección de la onda: $135^\circ$	10.17
Figura 0.115 Evolución de la superficie del mar entre $t=360\text{min}$ y $t=500\text{min}$ de ejecución. Velocidad de la onda: 30m/s. Dirección de la onda: $135^\circ$	10.18
Figura 0.116 Localización del punto de análisis	10.19
Figura 0.117 Variación de la amplitud de la onda de borde en función de la velocidad de la onda de presión atmosférica para una dirección de incidencia de $45^\circ$	10.21
Figura 0.118 Variación de la amplitud de la onda de borde en función de la velocidad de la onda de presión atmosférica para una dirección de incidencia de $135^\circ$	10.22
Figura 0.119 Variación de la amplitud de la onda de borde en función de la velocidad de la onda de presión atmosférica para dos diferentes direcciones de propagación de la misma. Resultados para la onda de borde de $T = 3.53\text{ h}$	10.23
Figura 0.120 Localización general de las bahías analizadas	11.3
Figura 0.121 Localización de las bahías Alfacs y Fangar, España	11.4
Figura 0.122 Localización de las bahías Alcudia y Palma (Mallorca), España	11.6
Figura 0.123 Localización de las bahías Grand-Soufre y Golfo de Fos, Francia	11.7
Figura 0.124 Localización de Sacca di Goro, Italia	11.8
Figura 0.125 Comparación del modo propio de oscilación de las bahías analizadas y de la plataforma continental en la que se encuentran emplazadas	11.11

## **ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 4.1. Parámetros estadísticos y análisis de calidad de la serie de nivel del mar de San Carles de la Ràpita y l’Ampolla	4.11
Tabla 5.1. Características de las cartas náuticas de la zona de estudio	5.6
Tabla 5.2. Período resonante bahía de Alfacs en bajamar, media marea y pleamar	5.14
Tabla 5.3. Período resonante bahía de Alfacs en bajamar, media marea y pleamar	5.14
Tabla 5.4. Estimación de la amplitud máxima de las ondas resonantes en las bahías de Alfacs y l’Ampolla para las condiciones de media marea	5.18
Tabla 6.1. Parámetros estadísticos y análisis de calidad de la serie de velocidad del viento en San Carles de la Ràpita y l’Ampolla	6.15
Tabla 7.1. Parámetros estadísticos y análisis de calidad de la serie de presión atmosférica de San Carles de la Ràpita y l’Ampolla	7.11
Tabla 8.1. Umbrales de resonancia	8.12
Tabla 8.2. Eventos seleccionados para el análisis espacial de la presión atmosférica	8.17
Tabla 9.1. Modos propios de oscilación de la plataforma Valencia-Barcelona	9.3
Tabla 10.1. Casos analizados	10.11
Tabla 11.1. Sitios de interés para la comparación entre el período resonante de la plataforma continental y el período resonante de la bahía	11.3
Tabla 11.2. Resumen morfométrico de las bahías de interés	11.8
Tabla 11.3. Resumen morfométrico de las plataformas continentales en las que se localizan las bahías de interés	11.8
Tabla 11.4. Modos propios de oscilación identificados en las plataformas continentales de interés	11.9
Tabla 11.5. Modos propios de oscilación identificados en las bahías de interés	11.10

---

## **ÍNDICE DE ANEXOS**

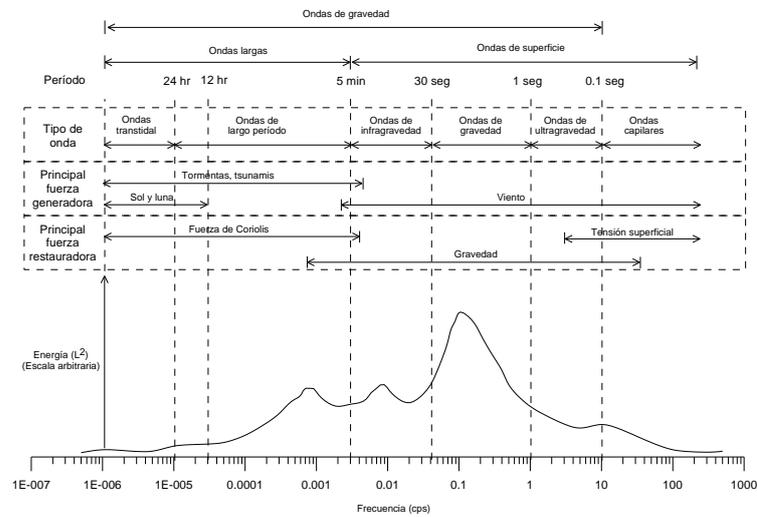
- Anexo 1: Resultados del análisis temporal del nivel del mar y energía wavelet en Alfacs y Fangar
- Anexo 2: Modelo MSP
- Anexo 3: Análisis mensual del nivel del mar y la presión atmosférica en Alfacs y Fangar



# **1. INTRODUCCIÓN**

## **1.1 Generalidades**

Las costas están formadas por infinidad de unidades fisiográficas y estructuras naturales y artificiales (playas, estuarios, bahías, ensenadas, puertos, etc). Sea cual sea su génesis, todas están sujetas a la acción de distintos tipos de ondas que están presentes en el océano. La existencia de esas oscilaciones pone de manifiesto la propagación de energía mecánica a lo largo de la interfase agua-atmósfera, que constituye la superficie del mar. Estas ondas cubren un amplio rango de escalas espacio-temporales, tal como lo muestra la Figura 1.1, y su energía depende de la magnitud de la fuerza que actúa sobre el agua.



**Figura 1.1 Escala espacio-temporal de las ondas en el océano**

De todas estas ondas, las de gravedad (oleaje) son quizás el tipo de onda mejor estudiada. Debido a que se origina a partir de la influencia de variables meteorológicas, el oleaje es una variable sujeta a cambios aleatorios y, por tanto, se estudia mediante técnicas de análisis estocástico y modelación numérica. La relación directa con los campos de viento es clara y la transformación que sufre a medida que se aproxima a la costa es, en términos generales, fácil de obtener. De esta manera, es relativamente sencillo conocer la magnitud de la altura, el período y la dirección principal de una ola en un sitio determinado. Gracias a esto, sus efectos sobre la morfología del litoral han sido bien estudiados, sobre todo su influencia en las formas en planta y perfil de una playa.

Las ondas largas son las oscilaciones cuya longitud de onda es mucho mayor que la profundidad a la cual se propagan. En términos prácticos, en cercanías de la costa son aquellas con períodos de onda mayores que 25 s. Los mecanismos que aportan energía a estas ondas son de diferente naturaleza: atracción planetaria, movimientos sísmicos y perturbaciones meteorológicas principalmente. En particular, las ondas generadas por las dos primeras causas, mareas astronómicas y tsunamis respectivamente, han sido bien estudiadas.

La marea astronómica es un fenómeno determinista de cuyas componentes principales se conocen con cierta precisión, la amplitud, frecuencia y fase en cada punto del globo terráqueo. Su influencia en ciertas geoformas costeras también es bien conocida, sobretodo la relación entre el prisma de marea y las dimensiones de la bocana de un estuario, y entre la carrera de marea astronómica y la forma en planta y perfil de las playas.

Debido a algunos tsunamis ocurridos en los últimos años con gran impacto sobre ciertas comunidades (Por ejemplo, el tsunami observado en el Océano Índico el 26 de diciembre de 2004, con 275,000 muertos principalmente en Indonesia), últimamente esta variable ha acaparado la atención de una parte de la comunidad científica, académica y profesional. Las características de este tipo de ondas están bien identificadas desde su origen (la relación que existe entre el tipo de falla geológica y la formación de la onda) hasta su propagación hacia la costa como una onda solitaria.

Sin embargo, las ondas largas de origen meteorológico han sido poco estudiadas. Si bien la transformación que sufren en su recorrido hacia la costa puede ser analizada mediante modelación numérica con gran precisión, la génesis de muchas de estas ondas no se conoce bien y su influencia en la morfodinámica litoral mucho menos. Esta tesis desarrolla el análisis de la génesis de cierto tipo de ondas largas observadas en el Mar Mediterráneo, su comportamiento temporal y espacial, y la relación que existe con ciertas características hidrodinámicas y morfométricas de las zonas donde se propagan, características que generan una sobreamplificación resonante. A continuación se presenta una introducción que incluye la descripción del fenómeno, el planteamiento del problema, una descripción de la zona analizada y la estructura completa del documento.

## **1.2 Ondas largas, *seiches* y resonancia**

Las ondas largas, al igual que el resto de oscilaciones del mar, sufren transformaciones en su recorrido desde las zonas de generación hasta la costa. En un instante dado, el campo de

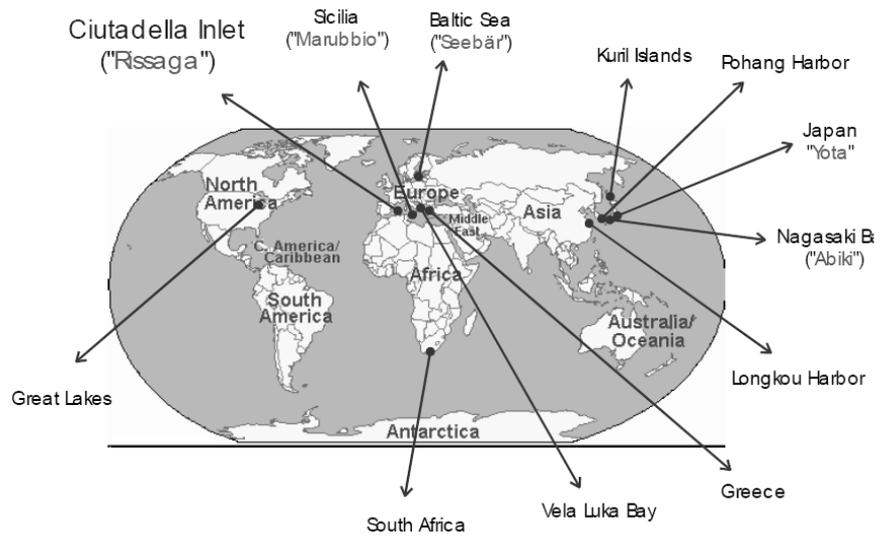
---

oscilaciones del mar se compone de multitud de estas ondas que interactúan simultáneamente. Si suponemos un océano infinito, de profundidad constante y sin interacción con la atmósfera, este campo de ondas permanecería invariable en el tiempo. Si, por el contrario, hay variaciones en los contornos y el fondo, como ocurre en la naturaleza, la interacción entre las ondas y estos límites geométricos genera modificaciones en la forma de la onda y esta, a su vez, en las características de la costa. Las playas, como ya se mencionó en el apartado anterior, son un claro ejemplo de esta mutua interacción, principalmente producida por las ondas cortas u oleaje. Algunas bahías y ensenadas podrían también ser el resultado de una interacción de este tipo con ondas de más largo período. Entonces, el campo de oscilaciones en un punto cercano a la costa es función de las ondas en un punto exterior y de la transformación que sufren entre el exterior y dicho punto cercano a la costa como consecuencia de la geometría en la cual se propagan.

La influencia de la geometría se mide en función de la magnitud de los procesos que afectan a la onda, esto es, en función de la transformación de la onda por asomeramiento, refracción, difracción, reflexión, absorción, etc. Es de esperar que cuanto mayor sea la influencia de los contornos y del fondo en la propagación de la onda, mayores serán las transformaciones que sufre la onda. Esto ocurre cuanto más cerrada (bahías, ensenadas) o somera (estuarios) es la zona donde propagan las ondas. Por ejemplo, cuando una onda se aproxima a una ensenada o bahía muy cerrada, la onda se asomera, difracta y refracta y, posteriormente, una parte es reflejada por los contornos de la entrada, otra es absorbida por los mismos y otra parte es transmitida hacia el interior, donde está sujeta a procesos similares. La superposición de la onda incidente y reflejada en el interior de la ensenada forma una onda estacionaria dentro de la misma, conocida como *seiche*.

La palabra *seiche* fue el término utilizado por el hidrólogo suizo François-Alphonse Forel en 1890 para nombrar a cierto tipo de ondas, generadas por el viento, observadas en algunos lagos alpinos (Lemán en Suiza y Geneva entre Suiza y Francia). Sin embargo, ese mismo fenómeno ha sido nombrado de diferentes maneras en otras partes del mundo: en los Grandes Lagos de Norteamérica, los seiches se suelen llamar *slosh*; en la bahía de Nagasaki, Japón, el *seiche* se llamó *Abiki*; en las Islas Baleares, España, se les ha llamado *rissagues*. La figura siguiente presenta un resumen de este tipo de ondas relacionadas con perturbaciones atmosféricas que han sido observadas y estudiadas en el mundo.

---



**Figura 1.2 Localización de sitios de observación de seiches**

Imagen Tomado de Vidal et al., 2000

Cuando las características geométricas (período y longitud de onda) de una onda cualquiera, y en particular de una *seiche*, coinciden de cierto modo con las características geométricas del sistema en el cual se propaga, en este caso una ensenada, se genera una amplificación resonante de la onda. El período con el cual se genera esa resonancia es conocido como modo propio de oscilación de la ensenada. El período y la distribución espacial de la superficie libre para el modo propio de oscilación son controlados por la forma y profundidad de la ensenada considerada. No necesariamente ese modo de oscilación existe en el clima marítimo de la zona. Si existiera, se generaría una amplificación resonante.

### 1.3 *Seiches* en el Mediterráneo español

Las oscilaciones resonantes son un fenómeno conocido y bien documentado en gran número de ensenadas y puertos en todo el mundo (Vidal et al., 2000). En algunas zonas del levante

peninsular español, Cataluña y las Islas Baleares se observan eventualmente variaciones del nivel del mar de amplitud extraordinaria que han sido correlacionadas con unas condiciones meteorológicas determinadas y la presencia de ondas gravitatorias atmosféricas (reflejadas en los registros de presión de superficie). De todos los puertos y ensenadas en los que estas oscilaciones se han observado, es de especial importancia, por la amplitud que alcanzan las mismas, por la frecuencia en que se producen, y por los tremendos daños que en algunas ocasiones han causado a las estructuras del puerto y a los barcos allí anclados, el puerto de Ciutadella en la Isla de Menorca (Ver Figura 1.2). Las oscilaciones resonantes observadas en este puerto tienen un periodo de unos 10.7 minutos y, como ya se dijo, son localmente denominadas *rissagues*. Su estudio durante años ha permitido conocer muy bien el comportamiento de estas ondas. Tintoré *et al.* (1988), Monserrat *et al.* (1991a, 1991b), Gomis *et al.* (1993) y Garcies *et al.* (1996) demostraron que estas amplificaciones resonantes, normalmente observadas en verano, tienen su origen en fenómenos atmosféricos. Vidal *et al.* (2000) mostraron numéricamente que estas oscilaciones se generan por un acoplamiento entre las perturbaciones atmosféricas y las ondas largas atrapadas entre las islas de Mallorca y Menorca.



**Figura 1.3 Efectos de las *rissagues* en el puerto de Ciutadella**

Imágenes tomadas de <http://meteoiberia.com/forum/index.php?topic=1427.0>

Sin embargo, en otras zonas, como en las bahías de Alfacs y Fangar (Figura 1.3), unidades morfológicas formadas por el delta del río Ebro, oscilaciones de este tipo han sido observadas en una frecuencia en torno a 3.5 horas por Camp (1995) en la primera y alrededor

de 1.5 horas en la segunda. Aunque la carrera de marea en el mar Mediterráneo no supera 0.4 m, la magnitud de estas oscilaciones puede representar en algunas ocasiones hasta el 100% de ese valor o incluso más. A pesar de que la magnitud relativa de estas ondas y la riqueza ecológica del ecosistema en el que actúan son muy importantes, los estudios que se han llevado a cabo para intentar entender sus causas y consecuencias son muy básicos.

En esta tesis se presenta un análisis detallado del problema identificado (ciertas ondas resonantes en las bahías de Alfacs y Fangar), así como unas hipótesis sobre los mecanismos forzadores y la demostración de su relación de causalidad con las ondas resonantes y, en particular, con mecanismos intermedios de plataforma entre el comportamiento atmosférico y las bahías de interés. En última instancia, se plantea someramente una relación entre este mecanismo intermedio de plataforma y la respuesta resonante de dichas bahías.



**Figura 1.4 Localización de la zona estudiada**

Imagen tomada de GoogleEarth

## **1.4 Importancia de las bahías naturales**

Cuando la costa es abierta, el análisis de las variables marítimas y de los procesos morfológicos es relativamente sencillo. Se puede estudiar, y de hecho así se hace, el clima marítimo de manera separada (marea astronómica, marea meteorológica, oleaje) y las contribuciones que cada una de esas variables hace en lo que se podría llamar la respuesta morfológica de las unidades costeras. Precisamente esas unidades costeras han sido muy estudiadas en sus diferentes escalas espacio-temporales. Se han parametrizado, sobre todo, las diferentes situaciones morfológicas de playas (tanto en planta como en perfil) y de algunos aspectos de los estuarios.

Sin embargo, cuando existen contornos que encierran parcialmente un volumen de agua, la interacción con los mismos empieza a complicar el análisis de las variables y los cambios en la morfología. La transferencia de energía de unas frecuencias a otras o la sobreamplificación de las ondas con ciertos períodos genera otros tipos de ondas más difíciles de identificar y de analizar, así como geofformas asociadas a estas ondas no comunes.

En las bahías naturales, esa acción recíproca entre variables y geometría genera, a su vez, gran biodiversidad, una configuración geomorfológica especial y asentamientos poblacionales históricos. El desarrollo ambiental y económico (incluyendo el turístico) de esas zonas está asociado a esos tres aspectos. Es por todo ello que las bahías naturales se constituyen en elementos del litoral de especial relevancia.

### ***1.4.1 Importancia ecológica***

Es esa fuerte interacción entre variables precisamente la que genera una diversidad ecológica que es común en casi todas las bahías. Si se supone que cada especie se adapta mejor a ciertas condiciones impuestas por una variable física o química, es lógico pensar que habrá más especies cuantas más variables haya o cuanta más variabilidad en las condiciones tenga una de esas variables, siempre y cuando no se superen los umbrales del desarrollo de las

especies. Dicho de otro modo, la biodiversidad parece estar directamente relacionada con el grado de entropía del entorno. Esa diversidad se puede medir, y de hecho así se hace (ver por ejemplo los índices de Margalef y de Shannon-Weaver), como una relación de entropía. El matemático Norbert Wiener (1894-1964) decía en 1948, en relación con el índice de Shannon-Weaver, que “*la noción de cantidad de información está, naturalmente, vinculada a la noción clásica de la mecánica estadística, la de entropía. Del mismo modo que la cantidad de información de un sistema es una medida de su grado de organización, la entropía de un sistema es una medida de su grado de desorganización; y un aspecto no es más que el negativo del otro*”. Ese mismo año, Ramón Margalef (1919-2004) planteaba entonces que la diversidad de un ecosistema no es función únicamente del número de especies, sino también del número de individuos por especie. Por tanto, cuanto más entropía exista (dada para esta explicación como la cantidad de variables físicas, y la variabilidad de las mismas, interactuando con geometrías complejas), más biodiversidad (medida según lo propuso Margalef) existirá. Eso es precisamente lo que ocurre en las bahías naturales. La fuerte interacción de las diferentes variables físicas con los irregulares contornos y la alta variabilidad de las mismas en algunos casos (caso la resonancia de ondas largas) provocan un mayor espectro de condiciones que, a su vez, generan una mayor biodiversidad. La importancia ecológica estará asociada, por supuesto, a algo más allá de la biodiversidad, pero ésta puede ser un buen indicador inicial de la misma.

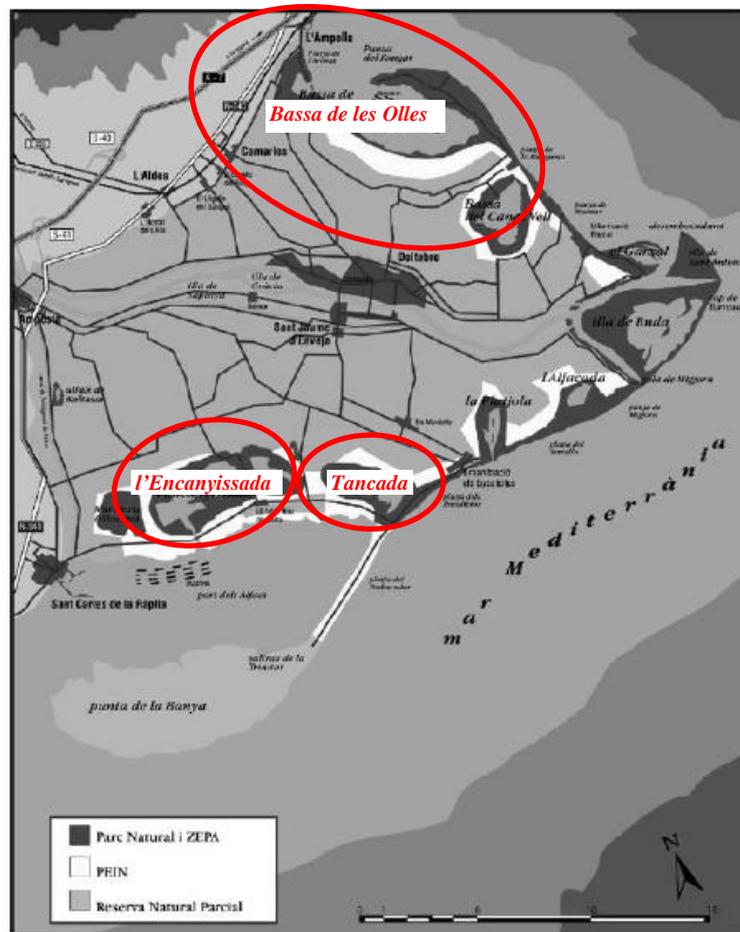
Para ejemplificar el asunto basta con dar un vistazo en la siguiente figura a los elementos de especial importancia ecológica del delta del Ebro, donde están localizadas las bahías de Alfacs y Fangar.

*l'Encanyissada* se comunica con la bahía de Alfacs de manera natural por un canal ubicado en la parte occidental de la laguna y posee un cinturón de vegetación helofítica considerable y zonas más pequeñas salinas. *La Tancada*, tal como dice su nombre (La Cerrada en castellano), no tiene comunicación directa natural con el mar (aunque sí con unas acequias y canales construidos por el hombre) y presenta abundante vegetación helofítica y en la parte Sur entra en contacto con la explotación de las salinas de San Antonio, razón por la cual, se encuentran en esa zona muestras de vegetación halófila, al igual que en el lado Este, donde se observan buenos ejemplares de junqueras halófilas. *La Bassa de les Olles* es la más pequeña de todas las lagunas del Delta del Ebro, es muy poco salada y está separada del mar

por una barra de arena. En todas estas lagunas es importante la presencia de macrófitos que no solamente ofrecen protección a los peces contra el calor y los depredadores, sino que constituyen un recurso alimentario de primera magnitud para las aves acuáticas.

En todas ellas es sumamente importante el intercambio de agua entre la descarga del río Ebro y la entrada de agua proveniente del mar Mediterráneo a través de sus bahías. La confluencia del medio marino y continental da lugar a una elevada diversidad de especies de peces (unas 50), lo que constituye una gran riqueza íctica. La acuicultura que se observa en el Delta está localizada en las bahías de Alfacs y Fangar, con una superficie de unas 5,000 hectáreas. Se cultivan, en orden de importancia, mejillones, ostras y almejas.

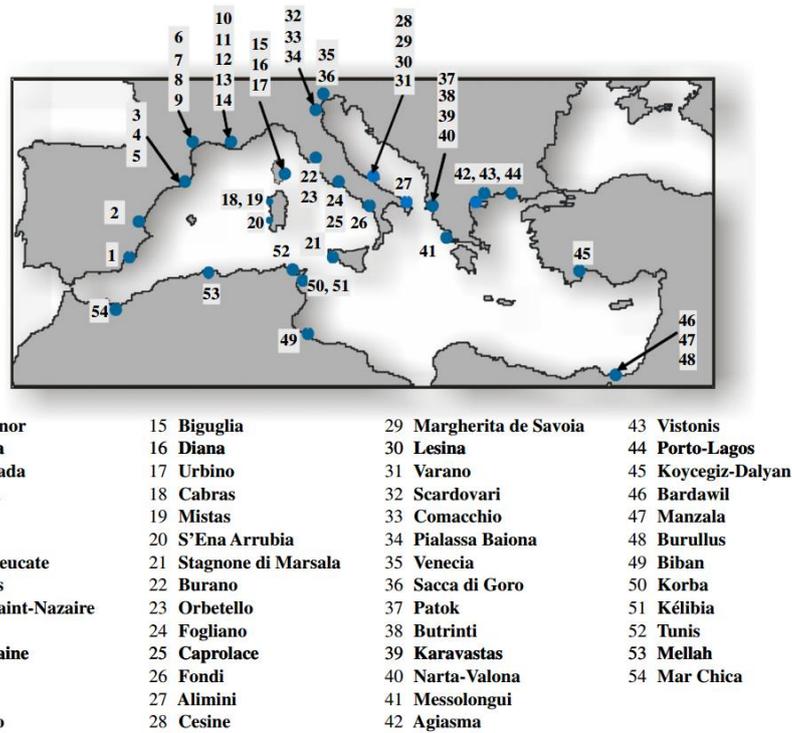
Si el volumen de agua que ingresa a la bahía aumenta, esto es cuando las ondas que inciden sobre la misma se amplifican, la proporción de agua salada en las lagunas también aumenta y, por ende, cambian las condiciones de vida de estas. Si este fenómeno es periódico, cabe esperar cualquiera de las dos siguientes situaciones: 1) La fauna y la flora de las lagunas se han adaptado a estos ciclos y son capaces de soportar estos cambios o 2) Hay ciclos de vida asociados a la variación temporal de los volúmenes de agua salada que ingresan a las lagunas.



**Figura 1.5** Localización zonas protegidas en el Delta del Ebro

Imagen tomada de Mollinet, 2007

Este mismo análisis bien podría hacerse en las bahías de Palma y Alcudia en Mallorca, o en el Golfo de Fos o la bahía de Grand Soufre en Francia, o en Sacca di Goro, en el delta del río Po. O, incluso, en cualquiera de las bahías del Mediterráneo o en las lagunas costeras asociadas a las mismas que se muestran en la siguiente figura. Todas ellas presentan cierto grado de complejidad ecológica y, algunas de ellas, morfológica y poblacional.



**Figura 1.6 Principales bahías naturales y lagunas costeras asociadas en el Mediterráneo, en relación con la disponibilidad de datos hidrográficos, geomorfológicos y ecológicos**

Imagen tomada de A. Pérez-Ruzafa et al. (2011)

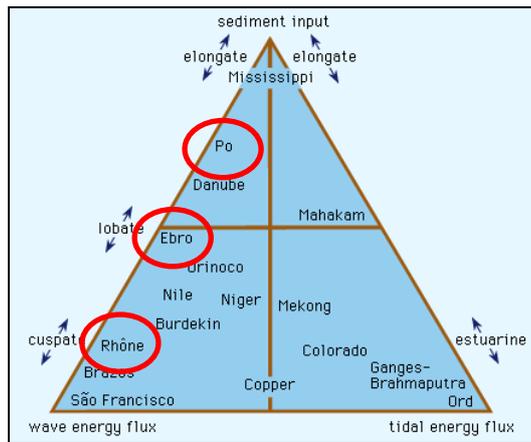
### 1.4.2 Importancia geomorfológica

Muchos autores han estudiado la evolución morfológica de los deltas. El Ebro, mostrado en la Figura 1.4, el Ródano y el Po, mostrados en la Figura 1.7, son tres ríos que no han sido la excepción. Los tres son deltas fluviales formados por las olas, según la clasificación que se muestra en la Figura 1.8.



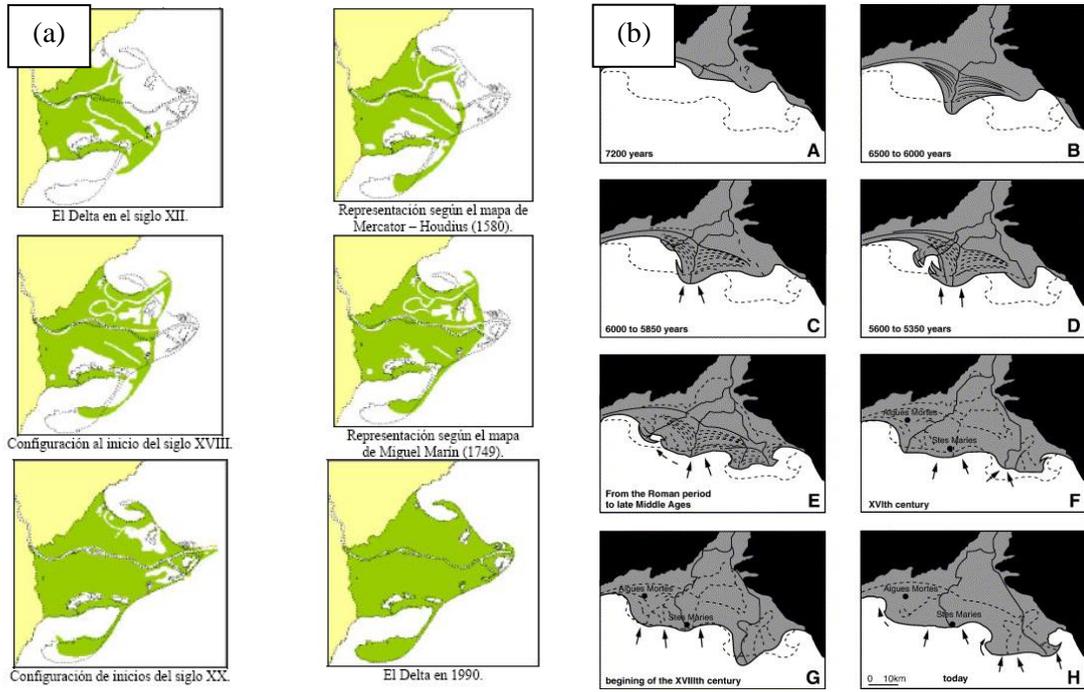
**Figura 1.7 Imágenes de los ríos Ródano y Po**

Imágenes tomadas de Google Earth

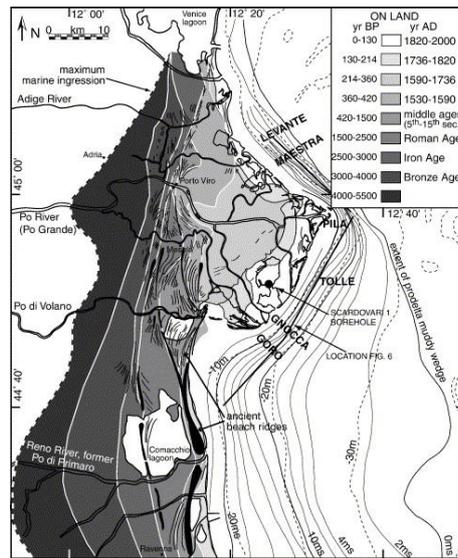


**Figura 1.8 Clasificación de Deltas según Galloway (1975)**

La evolución de estos tres deltas, por poner sólo esos tres ejemplos, es conocida hoy gracias a la recopilación de datos históricos y a estudios sedimentológicos de los mismos. Si bien en cada caso existen opiniones distintas respecto a su desarrollo, en lo que coinciden todas es en que la evolución de los últimos 500 años muestra la formación de las bahías laterales. Las figuras siguientes presentan la evolución temporal de los deltas de los ríos Ebro, Ródano y Po.



**Figura 1.9 Evolución morfológica de los deltas del (a) Ebro y (b) Ródano**  
 Imágenes tomadas de (a) Mollinet (2007), citando a Canicio e Ibáñez (1999) y (b) L’Homer et al. (1981)



**Figura 1.10 Evolución morfológica del Delta del Po**  
 Imagen tomada de Correggiari et al., 2001

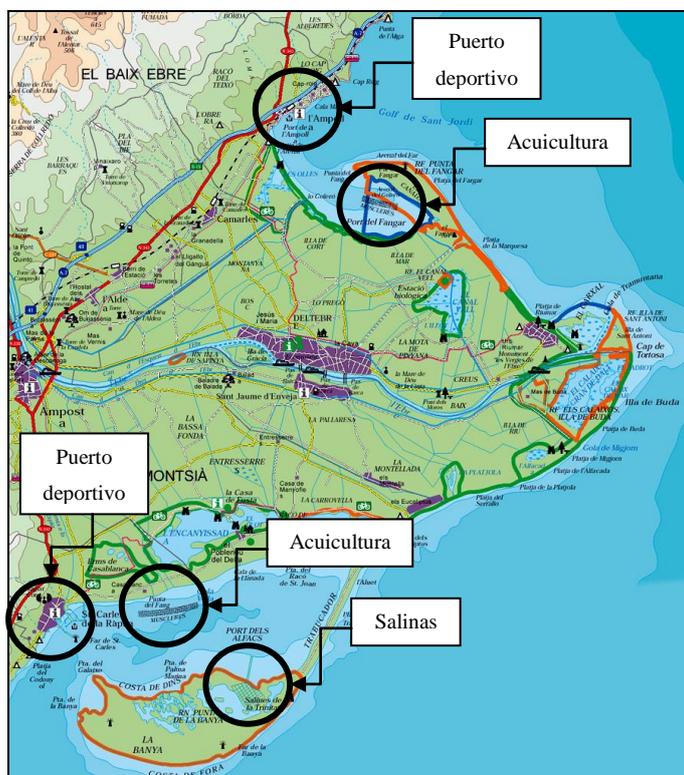
En toda la evolución de estos tres deltas pareciera que existiera un elemento forzador que no permitiera el cierre de ninguna de las dos flechas formadas en los lados de cada uno de ellos.

Además de servir como barrera de protección y de estabilización de algunos ecosistemas, la importancia morfológica de estos deltas se centra en la razón por la cual se han formado esas bahías, con formas similares aunque con tamaño diferente, que se han mantenido abiertas durante cerca de 500 años.

### ***1.4.3 Importancia económica***

El hecho de que en torno a las bahías se encuentren asentamientos poblacionales, independientemente de su tamaño (Por ejemplo, San Carles de la Ràpita en Alfacs, l'Ampolla en Fangar, Saint Louis du Rhône en el Golfo de Fos, Marsella en Grand Soufre, Goro en Sacca di Goro), responde a dos razones: 1. sus tierras ofrecen recursos naturales abundantes que, mediante diferentes formas de explotación, generan beneficios económicos a las comunidades locales, y 2. el abrigo que ofrece su forma semicerrada se convierte en una medida de protección contra el riesgo que representan las condiciones climáticas extremas. Por ilustrar la situación, a continuación se muestran los sitios de interés económico (relacionado únicamente con la zona marítima) de las bahías del delta del Ebro y del Golfo de Fos.

En resumen, la importancia de las bahías radica no sólo en el interés que puedan generar desde el punto de vista geomorfológico (desarrollan funciones de protección contra temporales y estabilización de la costa), hidrológico y oceanográfico (en el caso de bahías deltaicas, almacenan agua salobre producto de la mezcla del agua y del mar), sino también en la riqueza ecológica que albergan (son entornos muy productivos del que innumerables especies de plantas y animales dependen para su supervivencia). Y, además, sus tierras ofrecen beneficios económicos a las comunidades locales mediante la explotación tradicional de sus recursos naturales.



**Figura 1.11 Zonas de interés económico en las bahías del delta del Ebro**

Imagen tomada de <http://www.cuentametuviaje.es/wp-content/uploads/2009/05>



**Figura 1.12 Puerto de Saint Louis du Rhône, Golfo de Fos (Francia)**

Imagen tomada de <http://nautisme.lefigaro.fr/bloc-marine/fiche-port/informations-port-port-saint-louis-du-rhone-9339.php>

## 1.5 Interés investigativo

La importancia que tienen las bahías naturales ya fue explicada en el apartado anterior. En la práctica, desde el punto de vista del clima marítimo, lo que interesa es poder determinar con detalle y precisión todas sus componentes. Esto incluye las componentes de *seiche*, especialmente importantes, como ya se mencionó, en cuerpos de agua semicerrados (bahías, calas, ensenadas, etc). El análisis tradicional de las ondas largas implica la separación entre las componentes de marea astronómica, deterministas, y las componentes de marea meteorológica, estocásticas. Se parte del hecho de que las segundas son el residuo de la serie de tiempo restando las componentes de la primera. En caso de que se tengan instrumentos de medición al interior de cualquier bahía, y según su localización dentro de las mismas, los datos podrían evidenciar *seiches* existentes. En el caso en que se tengan que usar datos del exterior de la bahía de estudio para evaluar las condiciones al interior de la misma, el análisis tradicional no podría detectar esas ondas que, en muchas ocasiones, contienen más energía que las demás. Es por esto que se hace necesario ahondar más en el conocimiento de las *seiches*, sus mecanismos forzadores, su comportamiento espacio-temporal, y las consecuencias morfodinámicas que esas ondas generan. Es necesario poder llegar a entender cómo y por qué se forman y cómo funcionan para poder definir el clima marítimo correctamente al interior de las bahías. Los diseños de obras de protección, los diseños de puertos, los planes de ordenación del litoral, los estudios bióticos podrán hacerse mejor si se determina con precisión el clima marítimo en cada uno de los sitios de interés.

## 1.6 Estructura del documento

El documento producto de esta investigación se ha estructurado de la siguiente manera:

El CAPÍTULO 2 se presenta una revisión del estado del conocimiento en materia de metodologías para el análisis de *seiches*. Como se verá, el capítulo clasifica su contenido en

---

tres grandes apartados: 1) Sobre la forma de resolver el problema de estos eventos, 2) Sobre los mecanismos forzadores y 3) Sobre los estudios en diferentes zonas del mundo.

Los objetivos y la estructura general de la tesis se presentan en el CAPÍTULO 3.

En el CAPÍTULO 4 se identifican, mediante análisis de datos, las frecuencias anormales en los registros de nivel del mar en Alfacs y Fangar. El análisis se hace tanto frecuencial como temporalmente, con metodologías de Fourier y *wavelet*.

Para verificar que esas frecuencias identificadas previamente en los registros coinciden con los dos primeros modos propios de oscilación de las bahías de Alfacs y Fangar, en el CAPÍTULO 5 se hace una modelación numérica lineal.

El CAPÍTULO 6 muestra el análisis del viento como posible mecanismo forzador de la amplificación resonante en ambas bahías.

Posteriormente se evalúa la relación de ondas de presión atmosférica como causa generadora de los *seiches* identificados. Esta demostración se hace, frecuencial y temporalmente en Alfacs y Fangar, en el CAPÍTULO 7. En El CAPÍTULO 8 se hace un análisis espacial de la presión atmosférica.

En el CAPÍTULO 9 se demuestra, mediante modelación numérica lineal, que existe un fenómeno de plataforma intermedio, una onda de borde, entre los eventos de presión atmosférica y los episodios de amplificación resonante en las dos bahías analizadas.

En el CAPÍTULO 10 se modelan numéricamente algunos eventos resonantes en Alfacs y Fangar, con el fin de verificar las conclusiones obtenidas hasta este nivel.

Por último, en el CAPÍTULO 11 se plantea una relación entre el tipo de ondas resonantes observadas en Alfacs y Fangar con ciertas características morfológicas de dichas bahías. Esta relación se completa con la observación en varias bahías de similares características, localizadas en diferentes partes del mundo.

Las conclusiones de la tesis y las futuras líneas de investigación se plantean en el CAPÍTULO 12.

## **2. ESTADO DEL CONOCIMIENTO Y REVISIÓN DE OTROS ESTUDIOS**

### **2.1 Introducción**

Las oscilaciones resonantes son un fenómeno conocido y bien documentado en gran número de puertos y calas en todo el mundo. Como ya se ha mencionado, la amplificación resonante en una dársena es un problema que depende tanto de la geometría de la dársena como de la geometría de la onda incidente. También el tipo de mecanismo forzador difiere en cada caso, lo que hace que en el medio científico se observen con relativa frecuencia reportes de nuevos sitios donde se observan condiciones particulares.

En algunas calas y puertos del levante peninsular español, Cataluña y las Islas Baleares se han observado eventualmente variaciones del nivel del mar de mayor amplitud que las observadas en condiciones normales. Algunas de estas oscilaciones han sido correlacionadas con unas condiciones meteorológicas determinadas y la presencia de ondas atmosféricas, que

se reflejan en los registros de presión de superficie. Sin embargo, es posible que existan otros tipos de ondas forzadoras que no han sido estudiadas hasta el momento.

Con el objeto de mostrar un análisis exhaustivo de los estudios que se han realizado, tanto en la zona de estudio como en otras áreas geográficas diferentes, en este capítulo se presenta la revisión del estado del arte en relación con la resonancia portuaria, las ondas forzadoras y los mecanismos generadores de dichas ondas.

## **2.2 Estado del conocimiento y revisión de otros estudios**

Al parecer, la palabra *seiche* está relacionada con el término latino “siccus”, que significa “secar”. Otros autores creen que se origina de una palabra en dialecto suizo que significa "sacudirse hacia adelante y hacia atrás", y que ha sido usada por muchos años en la región para describir las oscilaciones en los lagos alpinos. Desde 1549 se conocen las crónicas de Schulthaiss sobre este fenómeno en el lago Constanza (Suiza) y, desde mediados del siglo XVII, el fenómeno se comenzó a registrar en los Grandes Lagos (EU) por Fra Marquette, Baron Hontan y otros.

Pero la palabra *seiche* fue introducida por primera vez en el ámbito científico por el hidrólogo suizo François-Alphonse Forel en 1890, quien había observado un efecto resonante en el lago Ginebra (Suiza). Las primeras correlaciones entre este fenómeno y ciertas condiciones atmosféricas son atribuidas a Vaucher, a principios del siglo XIX.

Actualmente, esta palabra se utiliza también para nombrar grandes oscilaciones de largo período en otras áreas y geometrías diferentes a los lagos alpinos. Muchos autores han mostrado que los *seiches* ocurren en otras áreas del mundo. Desde un principio, se han estudiado y analizado registros in situ para demostrar las causas, los comportamientos y consecuencias de este tipo de eventos. Desde hace unas décadas, la metodología de estudio ha mostrado una clara evolución entre el planteamiento de modelos analíticos de geometrías básicas hasta el uso de modelos numéricos.

A continuación se presenta un análisis de las investigaciones realizadas hasta ahora en relación con los *seiches* y la resonancia portuaria. Este análisis pretende mostrar la evolución de cada una de las metodologías utilizadas para el estudio del fenómeno, con el fin de establecer las carencias en el estado del arte que nos impiden abordar el tema en el Mediterráneo español con el alcance deseado.

### ***2.1.1 De la forma de resolver el problema***

En este apartado se hace una rápida revisión del estado del conocimiento en cuanto a la forma en que tradicionalmente se ha abordado el problema de la resonancia por onda larga en bahías naturales y dársenas portuarias.

- **El análisis de datos**

Para abordar cualquier problema de ingeniería es necesario tratar y analizar datos de distintas variables climáticas, ya sean marinas o atmosféricas. Estos datos pueden haber sido registrados en campo o en laboratorio, pero en todos los casos son la base de partida para un buen análisis. Si bien los primeros reportes sobre resonancia se basaron únicamente en la observación, desde los primeros albores de la ingeniería de puertos y costas se han utilizado algunas técnicas de tratamiento y análisis de datos, como la transformada rápida de Fourier. Últimamente, otras herramientas están siendo muy usadas para abordar este tipo de problemas, por ejemplo, la transformada *wavelet*.

El análisis de Fourier fue la técnica utilizada por Gomis et al. (1993) y Garcies et al. (1996) y otros más para proponer un acoplamiento entre ondas de presión atmosférica y ondas de 24.4 minutos de período atrapadas entre las islas de Mallorca y Menorca (España). Comparando los espectros de energía de la presión atmosférica y nivel del mar en un punto dentro de la ensenada de Ciutadella, Menorca (España), observando la variación de la energía de la onda de 10.67 minutos (que coincide con el período propio de la ensenada) a lo largo del tiempo y un espectro de diferencias de fase y de coherencia entre las dos señales, se atreven también a proponer una relación entre la onda resonante y la velocidad de la onda de presión

atmosférica. Okihiro et al. (1993) y Okihiro y Guza (1996) utilizan también el análisis de Fourier para el análisis que hacen sobre la resonancia de tres pequeños puertos en Hawaii y California (Estados Unidos). En general, hasta finales de la década pasada casi todos los autores utilizaron esta técnica para analizar los datos de nivel del mar y de los mecanismos forzadores asociados a perturbaciones atmosféricas (presión y viento).

El análisis *wavelet* es una técnica relativamente nueva. En los últimos años se ha notado un mayor interés de la comunidad científica en aplicarla en diversos campos. En ciencias como la meteorología (Torrence y Compo, 1998) y la sismología (Morlet, 1981, 1983; Goupillaud, 1984) ha tenido mayor difusión. Su potencial de aplicación en el análisis de datos de ingeniería oceanográfica y costera fue muy bien descrito por Liu (1995) en uno de los primeros artículos al respecto, aunque antes que éste otros autores ya la usaban de manera incipiente (Meyers et al., 1993; Mori y Yasuda, 1994). Bell et al. (2000) también la aplicaron para investigar las variaciones del nivel del mar en el contexto del cambio climático y la variabilidad del fenómeno de El Niño Oscilación del Sur, ENOS, en Nueva Zelanda. Massel (2001) mostró sus bondades para el análisis de series de datos de oleaje.

Algunos autores han querido relacionar ondas de presión atmosférica con la resonancia de ondas largas en ensenadas y bahías, representando la variación de la energía de la onda resonante a lo largo del tiempo obtenida mediante el cálculo de la transformada de Fourier por ventanas móviles temporales (Gomis et al., 1993; Garcies et al., 1996). Con la transformada *wavelet* se puede hacer esto sin perder información en ninguna de las frecuencias analizadas. Luettich et al. (2002) encontraron una frecuencia resonante semi-diurna (13.2 horas) en un estuario micro-mareal (Albemarle-Pamlico, North Carolina, EU). Mediante la comparación de espectros *wavelet* de nivel del agua y gráficos de velocidad del viento, concluyeron que los más fuertes *seiches* parecen ser generados por una variabilidad significativa tanto de la magnitud como de la dirección del campo de vientos. Jong et al. (2003) utilizaron también la técnica *wavelet* para demostrar un acoplamiento entre el paso de frentes fríos sobre el Mar del Norte con las oscilaciones de 0.25 m de altura de ola registradas en el puerto de Róterdam (Holanda).

- **Los modelos analíticos**

La resonancia por onda larga en un cuenco de agua ha sido un fenómeno estudiado teóricamente desde hace tiempo. Se han derivado expresiones con las que se intentaba estimar rápidamente los modos resonantes de una dársena de geometría sencilla. Proudman (1953) las planteó para lagos y Wilson (1966, 1972) para muchas otras geometrías. Estas expresiones están muy bien resumidas en Dean y Dalrymple (1991), pero todas ellas, son modificaciones al primer caso (dársena rectangular de profundidad constante con las dos paredes perfectamente reflejantes), desarrollado en 1828 y conocido como “fórmula de Merian” (Ver expresión 2.1). Para cualquier geometría simple, los modos resonantes,  $T_n$ , pueden ser obtenidos a partir de la siguiente ecuación:

$$T_n = \frac{2}{n} \int_{-l/2}^{l/2} \frac{dx}{\sqrt{g h(x)}} \quad (2.1)$$

donde  $n$  es el modo resonante,  $l$  la longitud de la dársena,  $g$  la aceleración de la gravedad y  $h(x)$  la función de variación del fondo en sentido longitudinal.

Posteriormente, comenzaron a plantearse formulaciones que asumen cierta proporcionalidad entre el coeficiente de amplificación en la dársena, la configuración geométrica de la misma y las características de la onda incidente, y no se limitan simplemente a encontrar el período resonante. En una primera etapa se derivaron expresiones para formas geométricas sencillas, tales como dársenas rectangulares (Kravtchenko y McNown, 1955; Miles y Punk, 1961; Ippen y Goda, 1963) o circulares (McNown, 1952), y posteriormente para configuraciones arbitrarias (Lee, 1971); incluso últimamente se han desarrollado modelos analíticos que intentan reproducir el acoplamiento no lineal entre varias dársenas adyacentes (Liu et al., 2003; Marcos et al., 2004). El efecto de la variación de la profundidad también ha tenido diferentes aproximaciones, con investigaciones que han considerado fondo plano (Lee, 1971, Liu et al., 2003; Marcos et al., 2004).

En dos de los primeros artículos publicados al respecto, McNown (1952) y Kravtchenko y McNown (1955) investigaron la respuesta de dársenas circulares y rectangulares, respectivamente, suponiendo que el antinodo se localizaba siempre en la bocana de las mismas. Lee (1971) hizo constar que esta condición impuesta a la entrada de la dársena no

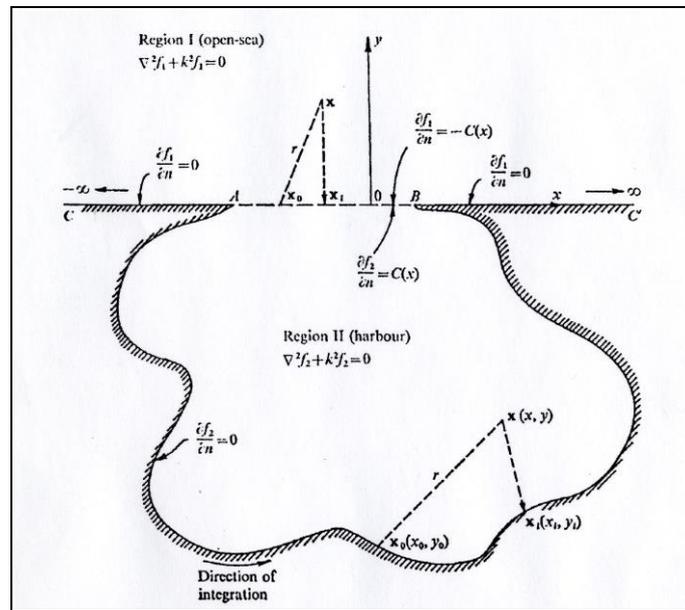
---

era satisfactoria, en el sentido que la pendiente de la superficie del agua en este sitio debe ser parte de la solución del problema y no debería ser impuesta a priori.

Miles y Punk (1961) plantearon la “Paradoja portuaria”: mientras más estrecho es el puerto, menos protegido lo es del *seiche*. Estos autores derivaron las frecuencias resonantes para puertos de geometría rectangular mediante una ecuación integral en términos de la función de Green y encontraron que, para este tipo de configuración, la amplitud de los “seiches” varía con la raíz cuadrada de su agudeza,  $Q$ . Se entiende como “agudeza” a la forma de la curva de amplificación  $f$  vs.  $A$ , donde  $f$  es la frecuencia resonante y  $A$  el factor de amplificación de la energía entre el exterior y el interior del puerto. También hallaron que, para este tipo de geometría,  $Q$  incrementa en proporción directa con el incremento de  $b/a$  y  $d/a$ , siendo  $b$  la anchura de la dársena,  $d$  la longitud de la misma y  $a$  la anchura de la bocana. En esta investigación se incluyó por primera vez el efecto de la radiación de la onda desde la bocana de la dársena hacia el mar, de tal modo que se pudo limitar la amplitud de la onda dentro de la dársena, incluso cuando ésta entraba en resonancia.

Ippen y Goda (1963) también estudiaron el problema de una dársena rectangular conectada con el mar. En este análisis, las ondas radiadas desde la bocana de la misma, fueron evaluadas mediante el método de transformación de Fourier, mientras la solución dentro de la dársena la obtuvieron utilizando el método de separación de variables.

Lee (1971) presentó una metodología que serviría de base para derivar expresiones que describen la respuesta de cualquier dársena a las condiciones impuestas por cualquier onda larga. La única limitación que tiene esta investigación es la hipótesis de fondo constante en el proceso. Mediante la aplicación de la solución de Weber a la ecuación de Helmholtz en dos regiones, dentro y fuera de la dársena (Figura 2.1), obtuvo la solución final igualando la amplitud de la onda y sus derivadas en la bocana.



**Figura 2.1 Esquema utilizado por Lee (1971) para el planteamiento del estudio analítico de la resonancia portuaria**

Posteriormente, Su (1975) derivó fórmulas asintóticas para calcular la superficie y la velocidad de entrada en una dársena de forma arbitraria de profundidad variable localizada en una costa recta.

Debido a la no-linealidad de los efectos observados, al avance del conocimiento en métodos numéricos y al desarrollo de herramientas computacionales que permitieran su ejecución, a partir de los primeros años de la década de los 70's, los esfuerzos en este tema se dedicaron especialmente al desarrollo de modelos numéricos para el estudio de la resonancia por onda larga en puertos, lagos, estuarios y bahías naturales.

Sin embargo, últimamente se ha retomado el desarrollo de modelos analíticos para el estudio de las condiciones resonantes de algunos sitios particulares. En Ciutadella, Menorca (España), un modelo analítico para el estudio del acoplamiento resonante de dos dársenas adyacentes ha sido planteado por Liu et al. (2003), Liu et al. (2004) y Marcos et al. (2004). Ellos parten del trabajo metodológico de Lee (1971) para encontrar una formulación que describe correctamente la respuesta de las dársenas de Ciutadella y Platja Gran. Los

resultados los contrastan con resultados experimentales y con los arrojados por la ejecución de un modelo numérico bidimensional que resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes, con las aproximaciones para la onda larga, en una malla en diferencias finitas.

Un documento que presenta un buen resumen de los modelos analíticos para *seiches* es el *Seiches and Harbour Oscillations*, escrito por Alexander B. Rabinovich en 2008.

- **Los modelos numéricos**

Como se ha dicho anteriormente, a medida que los modelos numéricos iban desarrollándose, la atención hacia los modelos analíticos iba en descenso. A partir de la segunda mitad de la década de los 60's y primera de los 70's, los primeros artículos sobre el análisis numérico de las oscilaciones de ondas largas en dársenas empezaron a aparecer en las publicaciones científicas. Por ejemplo, Wilson et al. (1965) estudiaron oscilaciones de onda larga en una dársena de profundidad variable usando un método en diferencias finitas donde la condición de entrada en la bocana debería ser correctamente asumida. Leendertse (1967) también desarrolló un esquema numérico en diferencias finitas para la propagación de ondas largas en una dársena de forma arbitraria al que se le debía dar las condiciones de superficie libre en el límite abierto del dominio. Hwang y Tuck (1970) presentaron un trabajo similar para una dársena de geometría arbitraria pero profundidad constante.

A partir de la ecuación de la pendiente suave o "*mild slope equation*", MSP, obtenida por Berkhoff (1972) considerando fondo con variación suave en una longitud de onda, Chen y Mei (1974) desarrollaron un modelo híbrido en elementos finitos que resuelve dicha ecuación para las ondas largas en dos dimensiones bajo teoría lineal. Desde entonces, el desarrollo de modelos numéricos tuvo especial interés en la comunidad científica y académica. En muchos proyectos de ingeniería se comenzaron a aplicar este tipo de modelos basados en la MSP (Houston, 1977). Massel (1993), Chamberlain y Porter (1995), y Kirby y Dalrymple (1994) modificaron la ecuación de Berkhoff (1972) para poder aplicarla a geometrías complejas y fondos con abrupta variación, inclusive. Su uso está todavía muy generalizado entre los ingenieros de puertos y costas. Normalmente la reflexión es una variable de entrada al modelo y su valor depende del criterio del usuario. En muchos casos la no-linealidad que se observa en la resonancia por onda larga, así como la transferencia de

---

energía entre unas frecuencias y otras, hace que estos modelos no tengan la aplicabilidad necesaria para analizar completamente ciertos problemas. En cualquier caso, pueden considerarse apropiados para analizar el comportamiento espacial de la onda larga cuando una dársena entra en resonancia.

Modelos hidrodinámicos bidimensionales que resuelven las ecuaciones de Navier-Stokes, 2DH, también han sido utilizados para el estudio de la resonancia por onda larga en algunos casos particulares. Este tipo de modelos tienen en cuenta las hipótesis de las ondas largas para hacer algunas simplificaciones a la hora de resolver las ecuaciones: las variaciones del flujo en vertical y, en particular, las aceleraciones verticales,  $(\delta w/\delta t)$ , son de muy pequeña magnitud y, por tanto, pueden ser despreciadas. Esta simplificación del sistema de ecuaciones general produce como resultado que el flujo tenga una ley de presiones hidrostática, pudiendo integrarse las ecuaciones respecto a la profundidad y expresarse en dos dimensiones. La ventaja que tienen estos modelos frente a los que resuelven la MSP es que estos últimos sólo pueden ser aplicables si se considera que las ondas incidentes son ondas libres. Por una parte, los modelos 2DH pueden mostrar la deformación de la onda como consecuencia de su interacción con el fondo y los contornos. Por otra, aceptan como condición de entrada series de ondas, lo que los hace adecuados para el estudio de ondas de grupo como generadoras de resonancia, por ejemplo.

Loomis (1972) adaptó las ecuaciones de Navier-Stokes para aguas someras a instalaciones portuarias reales, aunque sin incluir los efectos de la refracción, difracción y asomeramiento, pero sí considerando el factor de fricción por fondo propuesto por Leenderste (1967). Vidal et al. (2000), Marcos et al. (2001), Marcos (2004) y Agudelo et al. (2005a, 2005b) han utilizado este tipo de modelos para observar el comportamiento de la resonancia por una onda larga de 640 s de período en Ciutadella, Menorca (España).

Los modelos más investigados últimamente para estudios de agitación y resonancia son los que se basan en las ecuaciones de Boussinesq. Las primeras ecuaciones de este tipo aplicadas a la ingeniería de puertos y costas fueron derivadas por Peregrine (1967), las cuales asumían débil dispersión y débil no-linealidad. Dingemans (1973) incluyó un orden de dispersión y de no-linealidad mayor. Estas ecuaciones se limitaban a aguas muy poco profundas. Murria (1989) y Madsen (1991) se encargaron de extender su rango de

---

aplicación hacia aguas más profundas. Posteriormente, Nwogu (1993) propuso las “ecuaciones modificadas de Boussinesq”, que permitían la propagación de ondas desde aguas intermedias hacia aguas someras. Wei et al. (1995) y Gobby y Kirby (1996) desarrollaron las “ecuaciones extendidas de Boussinesq”, mejorando el cálculo del comportamiento no lineal del oleaje. Madsen et al. (1996) presentaron mejoras en las ecuaciones para aumentar el orden en la dispersión y en la no-linealidad.

Estos modelos basados en las ecuaciones de Boussinesq se han desarrollado tanto en diferencias finitas (ver, por ejemplo, Dalrymple, 1999) como en elementos finitos (Woo y Liu, 2004). Una revisión exhaustiva de la simulación numérica de la resonancia portuaria por medio modelos basados en las ecuaciones de Boussinesq puede ser encontrado en Díaz (2005).

- **Los modelos físicos**

Tanto la modelación analítica como la modelación numérica han necesitado de comparación experimental para validar sus resultados. Si bien en casi todas las investigaciones es común encontrar la validación de resultados con datos de laboratorio, en muchos casos, incluso, estudios sobre la resonancia portuaria se han llevado a cabo mediante modelos físicos de la obra a escala reducida sin considerar modelación matemática. Los estudios teóricos para analizar la resonancia y los ensayos de casos reales se realizan a menudo.

Muchos de los ensayos de laboratorio de carácter teórico han sido realizados para estudiar la onda larga vinculada a grupos (Ver por ejemplo, Bowers, 1980; Ottesen-Hansen et al., 1980; Westhuis, 2001) e, incluso para verificar la existencia de ondas de borde en dársenas (Nakamura, 1975). De Girolamo (1996) presentó una serie de ensayos de laboratorio con los que comparó la resonancia portuaria producida por una serie de ondas largas regulares y la generada por las ondas largas vinculadas a grupos. En el primer caso, el modo fundamental se amplifica junto con todos los superarmónicos con frecuencias alrededor de la del modo resonante más alto. En el segundo caso, los coeficientes de amplificación de las ondas largas vinculadas a grupos son del orden del 50% del observado para las ondas regulares. Al margen de las posibles imprecisiones de todo modelo físico, el autor plantea que los procesos

---

resonantes excitan todos los armónicos cuyas frecuencias están alrededor de la frecuencia del modo resonante de la dársena.

La modelación de casos reales se enfoca hacia el estudio del efecto resonante de ondas largas en diferentes geometrías. Quizás uno de los modelos físicos más documentados es el del puerto de Long Beach, Los Ángeles (Estados Unidos). El Cuerpo de Ingenieros de la Armada de Estados Unidos, USARMY Corps por sus siglas en inglés, construyó dicho modelo en 1970, entre otras cosas, para el estudio de la resonancia por onda larga. En algunos puntos del puerto, una onda de alrededor de 350 s de período pudo ser reproducida físicamente, en clara concordancia con datos instrumentales. Seabergh y Thomas (1995) describen detalladamente las características del modelo físico. En otro trabajo, Kofoed-Hansen et al. (2000) modelaron tanto numérica como físicamente la respuesta del nuevo puerto deportivo del Distrito Central de Beirut (Líbano) a la incidencia de ondas largas. Díaz (2005) y Marcos (2004) presentan ensayos de laboratorio para el análisis de la resonancia de dos dársenas contiguas, rectangulares y de fondo plano, un modelo físico cuya intención era reproducir el comportamiento de ondas largas en la ensenada de Ciutadella, Menorca (España).

### ***2.1.2 De los mecanismos forzadores***

Las oscilaciones en las frecuencias de *seiche* se han relacionado con diferentes mecanismos forzadores, tales como perturbaciones atmosféricas (Hibiya and Kajiura, 1982; Gomis et al., 1996, Jong et al., 2003;), vientos (Hodzic, 1979), ondas de borde (Lemon, 1975; Yanuma y Tsuji, 1998; Liu et al. 2002), eventos de tsunamis (Lepelletier, 1980; Van Dorn, 1984; Zelt, 1986; Sinadinovski et al., 2001), y ondas internas generadas por mareas (Giese et al., 1990), surf-beat (Wilson, 1972). Efectos resonantes en algunos puertos también han sido relacionados con las ondas de grupo (Longuet-Higgins y Stewart, 1962; Bowers, 1988; de Girolamo, 1996). En este apartado se hace especial énfasis en la revisión de las investigaciones relacionadas en la generación de *seiches* asociadas a los cuatro primeros mecanismos mencionados.

---

- **Vientos**

Como ya se ha mencionado, Buchwald y de Soeke (1973), para intentar explicar la mayor duración de las oscilaciones en la bahía de Jervis (Australia) en comparación con el paso de frentes de presión atmosférica, sugirieron que el viento podía ser un mecanismo intermedio entre una y otra variable. Sin embargo, parece que su propuesta no generó ninguna investigación posterior.

Salvo esta investigación, las relaciones entre viento y resonancia han estado generalmente vinculadas a lagos y áreas semi-cerradas de la costa. Por ejemplo, Luettich et al. (2002) analizaron la relación entre series de nivel del agua y de velocidad y dirección del viento, demostrando con datos y modelación numérica lo que sugerían trabajos anteriores (Luettich et al., 2000).

- **Perturbaciones atmosféricas**

Cambios de gran escala en los campos de presión, asociados con diferentes tipos de frentes, pueden generar ondas largas en el mar. La interacción entre la superficie del mar y las ondas de presión atmosférica produce una transferencia de energía entre la atmósfera y el mar, en este caso, generando ondas largas (Donn y Balachandran, 1964). Algunas veces, a este tipo de *seiches* se le ha llamado “meteo-tsunamis”. Muchas de estas ondas largas generadas de esta forma coinciden con los modos propios de oscilación de ciertas bahías, ensenadas y puertos. Relaciones de este tipo se han reportado desde hace algún tiempo, con una clara evolución en la manera de analizar el problema.

Buchwald y de Soeke (1973) observaron en los registros de la bahía de Jervis (Australia) que las ondas largas generadas continuaron oscilando por un período cercano a un día después de haber pasado un frente de presión atmosférica que viajaba a lo largo de la plataforma. Concluyeron que, si bien el mecanismo generador de la oscilación podía estar asociado a dicha perturbación atmosférica, apoyados en modelación numérica, debía haber un mecanismo intermedio que mantuviera activa la oscilación, para lo cual sugirieron el viento como posibilidad a estudiar.

En la bahía de Nagasaki (Japón), Hibiya y Kajiura (1982) demostraron numéricamente que un aumento repentino de 3 mbar seguidos por un decrecimiento gradual en la presión generaba ondas largas en el mar. En la zona este fenómeno se ha observado desde hace tiempo y es conocido como “abiki”.

Candela et al. (1999) simularon numéricamente saltos de presión atmosférica que produjeron *seiches* en puertos de Sicilia (Italia).

Recientemente Jong et al. (2003) relacionaron, por medio de análisis de datos y simulación numérica, el paso de dos tipos de frentes fríos, a los que llamaron “classical cold-front” y “split cold-front”, respectivamente, sobre el Mar del Norte con las oscilaciones de 0.25 m del nivel del mar registradas entre 1995 y 2001 en el Puerto de Rotterdam (Holanda). Este mecanismo ya había sido planteado como hipótesis por Wemelsfelder (1957). Antes que Jong et al. (2003), Veraart (1994) retomó esta hipótesis y pudo correlacionar dos eventos de *seiches* con el paso de un frente frío por el Mar del Norte.

Quizás el fenómeno más estudiado sea el de Ciutadella, Menorca (España). Gomis et al. (1993), Garcies et al. (1996), Montserrat et al. (1991a, 1991b), y Rabinovich y Montserrat (1996, 1998) observaron que en la ensenada de Ciutadella, oscilaciones en la frecuencia de *seiche* llamadas *rissagues* en la jerga local tienen un período de 10.5 min, son usualmente observadas en verano y son generadas por el acoplamiento entre una perturbación atmosférica y ondas largas de 24.4 min de período atrapadas entre las islas Baleares. Esta hipótesis ha sido verificada con simulaciones numéricas por Vidal et al. (2000) y analíticamente (Liu et al., 2003, 2004; Marcos, 2004). Estos autores también encontraron que el acoplamiento entre las ensenadas de Ciutadella y Platja Gran juega un importante papel en la magnitud de la respuesta resonante. Agudelo et al. (2004, 2005) presentaron los regímenes medios y extremos de estas *rissagues*, nombre con el que se conoce en Ciutadella a este tipo de oscilaciones.

Montserrat et al (2006) y Marcos et al. (2009) demuestran que definitivamente existe un forzador externo, meteorológico, que determina las *rissagues* en las costas de las islas Baleares.

- **Ondas de borde**

Si bien Lemon et al. (1979) propone a las ondas de borde atrapadas en la plataforma continental como uno de los mecanismos forzadores de los picos resonantes encontrados en el puerto de San Juan, British Columbia (Canadá), su demostración no es muy rigurosa. Mediante análisis de datos, estos autores encuentran oscilaciones resonantes en 14.6 min, 21 min, 38.5, 55 min y 132 min. Los picos de 38.5 y 14.6 min son modos que se observan permanentemente en el registro del mareógrafo. Sin embargo, los otros modos no siempre son registrados. Proponen también que ondas de borde atrapadas en la parte interna de la plataforma continental puede ser el mecanismo forzador para el pico de 55 min; sin embargo, para verificar esta hipótesis se limitan a hacer un cálculo rápido mediante la fórmula de “Merian” en el “Imperial Eagle Channel”, utilizando 50 m de profundidad media y 18000 m de longitud. Por lo tanto, aunque es la primera vez que se propone a las ondas de borde como mecanismo forzador de un *seiche*, esta relación no queda muy bien establecida en el caso del puerto de San Juan.

Yanuma y Tsuji (1998) analizaron los datos de presión del fondo del mar para obtener las oscilaciones del nivel del mar en tres puntos diferentes de la isla Kyushu (Japón). Su análisis mediante espectros de Fourier y de coherencia entre las señales mostró algunos picos comunes, no asociados a las componentes de la marea astronómica. Haciendo uso de un modelo numérico bidimensional obtuvieron los períodos y la variación espacial de las amplitudes de los modos de oscilación de las ondas de borde (19.5 min, 16 min, 13.3 min y 12.2 min) en la plataforma continental. De esta manera pudieron comprobar con más certeza que las ondas de borde podrían ser las causantes de la resonancia de la onda de 16 min en el puerto de Makurazaki, uno de los tres puntos de interés. Curiosamente, Tominaga (1977) había sugerido que dichas ondas de borde eran inducidas por una perturbación atmosférica de pequeña escala cuando se movía hacia el Este.

Posteriormente, Liu et al. (2002) propuso analíticamente que ondas de borde podrían ser la causa de los picos de 32 min y 24 min observados en el espectro de superficie libre registrado en la plataforma continental frente a Ciutadella, Menorca (España).

- **Tsunamis**

Lepelletier (1980) aplicó tanto un modelo numérico en elementos finitos como un modelo analítico para corroborar la respuesta resonante no lineal de la bahía Ofunato, localizada en la costa Noreste de la isla Honshu (Japón), al tsunami generado el 16 de mayo de 1968 durante el terremoto “Tokachi-Oki”. Lo que hace interesante esta bahía es que en ella fue construido un dique en 1967 para reducir el impacto de un posible tsunami y los resultados pudieron ser comparados para las dos situaciones, con dique y sin dique. Entre otras cosas relacionadas con la teoría de la disipación de las ondas resonantes, este autor pudo concluir que el dique operaba selectivamente en el sentido que es eficiente en la disipación de la energía de la onda en el período correspondiente al modo fundamental de la bahía, pero no reduce los efectos correspondientes al segundo modo de oscilación.

### ***2.1.3 De los estudios en otras zonas del mundo***

Oscilaciones de largo período son observadas periódicamente en algunas áreas específicas alrededor del mundo. Eventos de este tipo, sobre todo relacionados con *seiches*, han sido registrados y estudiados con regularidad en puertos, lagos, estuarios y bahías naturales. Para ver lo generalizado que está el tema de la resonancia en dársenas naturales y artificiales en la ingeniería de puertos y costas, basta con buscar en las comunicaciones de los últimos 30 años de congresos relacionados. Es difícil no encontrar al menos un caso de estudio en cada uno de ellos. Una buena recopilación de los casos más característicos puede encontrarse en Vidal et al. (2000).

La revisión podría extenderse a otras geoformas costeras y continentales, como por ejemplo, al estudio que realizaron Rueda y Schladow (2002), que encontraron en el Lago Clear, en California (Estados Unidos), un primer modo de oscilación en 2.49 h, mediante un análisis espectral de las velocidades del flujo en algunos puntos del lago, o el desarrollado por As-Salek y Schwab (2004), quienes observaron en el lago Michigan (Estados Unidos) oscilaciones del nivel del agua de hasta 1.5 m de altura y menos de 2 h de período. Otro más reciente es el trabajo de Singer et al. (2011) en el lago Erie. No obstante, a continuación se presenta únicamente una revisión de las investigaciones que sobre la resonancia producida

---

por ondas en la frecuencia de *seiche* en puertos, bahías y estuarios, han sido realizadas en diferentes zonas del mundo.

- **Puertos**

El puerto de Long Beach, Los Ángeles (Estados Unidos), está muy documentado. Su estudio incluye modelos físicos y numéricos y su respuesta a diferentes episodios de onda larga ha sido presentada desde hace tiempo (Houston, 1977; Seabergh y Thomas, 1995; Li, 2002).

Okhiro et al. (1993) presentaron un estudio sobre los *seiches* dominados por las frecuencias de ondas infragravitatorias en un pequeño puerto en Hawai (Estados Unidos). , Estos autores se basaron para este estudio en el análisis de datos mediante espectros de Fourier y simulación numérica lineal con un modelo tipo MSP. Posteriormente, observaciones de resonancia relacionadas con energía en las frecuencias de “seiche” (0.005-0.03 Hz) fueron analizadas por Okhiro and Guza (1996) en tres pequeños puertos en Hawaii y California (Estados Unidos), uno de los cuales fue el que estudiaron Okhiro et al. (1993). Si bien la amplificación resonante fue asociada tanto a fenómenos meteorológicos como a registros de tsunamis, con la metodología utilizada no queda suficientemente claro que esta relación exista. En cambio, sí queda muy bien explicada la relación entre la energía en las frecuencias de “seiche” en el interior de los puertos y la energía en las frecuencias del oleaje swell en la plataforma exterior. También encontraron que, en los tres puertos, la amplificación resonante decrece (con un factor de 2) cuando incrementa la energía asociada a las frecuencias “seiche”, una tendencia que asociaron a los efectos no-lineales que produce la bocana, los contornos y el fondo.

Con el fin de aumentar la fiabilidad de los diseños, Kofoed-Hansen et al. (2000) modelaron numérica y físicamente la respuesta del nuevo puerto deportivo del Distrito Central de Beirut (Líbano) a la incidencia de ondas largas. Encontraron, con el modelo físico y con un modelo numérico que resuelve las ecuaciones de Boussinesq en dos dimensiones, que tanto ondas de 50 a 80 s de período (al que llamaron “modo natural”) como ondas con períodos de ~400 s (“modo Helmholtz”) podrían resonar en el puerto. Como los datos de entrada a los modelos son de carácter sintético, estos resultados sólo pudieron ser utilizados relativamente.

---

Gierlevsen et al. (2001) presentaron un estudio en el que analizaban la influencia de algunos cambios en la geometría del puerto de Sines (Portugal) en la resonancia por onda larga. Utilizaron un modelo basado en las ecuaciones de Boussinesq en dos dimensiones derivadas por Madsen et al. (1991, 1992). Al contrario de los anteriores autores, el aporte de esta investigación es más bien nulo, pues se limitaron a realizar simulaciones numéricas sin comparar con datos instrumentales o con modelos físicos.

El puerto de Rotterdam también ha sido estudiado con mucho interés. Además del estudio sobre el origen de los *seiches* en la zona realizado por Jong et al. (2003) y descrito en el apartado anterior, De Loof y Veldman (1994) se enfocaron en el estudio de la respuesta resonante dentro del puerto y Veraart (1994) y Kirkegaard (1996) en buscar el origen de los *seiches* y en demostrarlo por medio de simulación numérica, respectivamente.

- **Estuarios y bahías**

- *Estuarios:*

Como ya se mencionó, Luettich et al. (2002) encontraron una frecuencia resonante semi-diurna (13.2 horas) en un estuario micro-mareal (Albemarle-Pamlico, North Carolina, EU). A partir de series de tiempo de nivel del agua y velocidad y dirección del viento pudieron concluir que los mayores *seiches* eran generados por los cambios en el campo de vientos.

- *Bahías:*

Un caso de especial importancia para España es el que se produce en Ciutadella, Menorca. Localmente llamadas *rissagues*, los *seiches* que allí se observan han presentado una amplificación de hasta 30 veces en el interior de la ensenada. Este se ha convertido en un caso especial en España y el mundo y de estrecha relación con el fenómeno que ocurre en Alfacs y Fangar, la revisión sobre las investigaciones realizadas se hace a continuación.

Estas amplificaciones que se observan en Ciutadella eventualmente han sido correlacionadas con unas condiciones meteorológicas determinadas y la presencia de ondas gravitatorias atmosféricas. La primera referencia escrita sobre este fenómeno data del siglo quince y desde entonces se han registrado regularmente episodios singulares que han provocado

---

cuantiosos daños a las estructuras del puerto y a las barcas allí amarradas. Es muy recordado el episodio del 21 de junio de 1984 donde oscilaciones de más de tres metros y las fuertes corrientes asociadas afectaron al 70% de las embarcaciones. Después de muchos años de estudios, se ha llegado a la conclusión de que existe una relación indudable de las oscilaciones del nivel del mar en el puerto con oscilaciones simultáneas de presión atmosférica asociadas a trenes de ondas gravitatorias.

Durante los últimos 15 años se ha dedicado un gran esfuerzo a buscar las causas de las “rissagues”. La primera aproximación fue hecha de manera teórica (Tintoré et al., 1988), esbozando como posibles causas el acoplamiento entre ondas atmosféricas y las ondas atrapadas en la plataforma continental. Posteriormente se instaló un sensor del nivel del mar en el interior de la ensenada en el año 1988, datos que permitieron corroborar los primeros estudios teóricos. Estos trabajos de investigación han continuado en la búsqueda y comprobación mediante teoría y registros de los mecanismos forzadores de este tipo de *seiches*. (Montserrat et al., 1991a, 1991b).

Gomis et al. (1993) plantearon por primera vez que esta amplificación resonante producida por ondas de 10.6 min, observada generalmente en verano, tenía una relación directa con perturbaciones de presión, aunque no excluyeron la influencia de otros mecanismos, como la tensión superficial generada por el viento asociado a esas perturbaciones.

Garcies et al. (1996) corroboraron estos resultados a la luz de observaciones más detalladas y propusieron la generación de ondas de largo período “offshore” actuando como mecanismo intermedio y forzador de la resonancia en la ensenada. Mediante simulaciones numéricas.

Vidal et al. (2000) demostraron que esos eventos de resonancia eran originados por ondas de 24.4 min. de período atrapadas entre las Islas Baleares, que a su vez eran generadas por perturbaciones de presión viajando a una velocidad similar que la velocidad de fase de las ondas largas. Estos resultados permitieron concluir que existe un acoplamiento entre la ensenada de Ciutadella y la cala adyacente de Platja Gran.

Estudios más recientes tratan el tema analíticamente y corroboran estas conclusiones (Marcos et al., 2001; Liu et al., 2003, 2004).

Últimamente se han reportado pocos casos adicionales. Se siguen reportando eventos nuevos de sitios ya analizados (Jansa et al., 2007; Vilibic et al., 2008; Ramis et al., 2009), pero se ha frenado un poco los nuevos descubrimientos de *seiches*. Pareciera que el interés por este tipo de ondas ha decaído. Uno de los únicos casos reportados de *seiche* en los últimos años es el de las costas de Sri Lanka, asociados también a perturbaciones meteorológicas (Wijeratne et al., 2010).

### 2.3 Conclusiones

Un rápido resumen de la evolución en el estudio de los *seiches* permite concluir que, después de unas primeras observaciones del fenómeno en algunas geometrías particulares, éste ha sido abordado en cuatro fases diferentes. En primera instancia, los estudios teóricos que plantean la relación estrecha con la geometría. En segundo término, el análisis de registros para comprobar la teoría. En tercer lugar, la búsqueda de las causas y mecanismos forzadores mediante el planteamiento de modelos analíticos y de análisis de datos. Por último, el uso de la modelación numérica para el conocimiento de la estructura espacial y temporal de la onda, así como para el análisis de posibles efectos no lineales que generen la transferencia de energía de unas frecuencias a otras.

Si bien los *seiches* han sido bien estudiados en términos generales, en cada una de las cuatro fases existen carencias en las investigaciones realizadas. La importancia de geometrías sencillas en la amplificación resonante ha sido teóricamente estudiada con éxito desde hace mucho tiempo y, en consecuencia, no hay lugar para más investigaciones (Proudman, 1953, Miles y Punk, 1961; Wilson, 1966, 1972). Sin embargo, las geometrías complejas pueden generar acoplamientos entre dársenas que dan lugar a la transferencia de energía entre unas frecuencias y otras (Liu et al. 2003, 2004). Este, y otros efectos no-lineales, dependen de la geometría de cada caso que se estudia. Pueden ser interesantes aquellas investigaciones que planteen modelos analíticos para simplificar geometrías complejas particulares y poder hacer

cálculos rápidos sobre la resonancia de onda larga; no obstante, el gran avance en la modelación numérica hace carecer de sentido estas investigaciones.

Tradicionalmente se ha abordado el problema de los *seiches* en una zona determinada mediante el análisis de datos de nivel del mar y velocidades en un sitio del dominio. Donde no hay datos no se pueden hacer estudios. Donde hay pocos, no puede profundizarse mucho en el conocimiento del tema. En ese sentido, hacen falta metodologías que permitan aumentar la significancia estadística de los datos que hay en zonas donde no se tienen mediciones continuas.

Algunos mecanismos forzadores también han sido estudiados teóricamente con buenos resultados (Wilson, 1972; Hodzic, 1979; Van Dorn, 1984; Giese et al., 1990). En casos reales, muchos de ellos se han comprobado con distintas herramientas. En otros casos se han propuesto mecanismos cuya relación con la amplificación resonante no es del todo clara. Es más, no existe un sitio en el que se haya propuesto más de un mecanismo forzador, porque siempre se ha dado por hecho, sin mayores explicaciones, que el fenómeno causante del modo principal de oscilación en una dársena es el mismo factor desencadenante de los modos secundarios.

Poco se ha estudiado, también, sobre el efecto que tienen estas ondas en geoformas costeras.

Todas estas cuestiones hacen concluir que no es posible generalizar el comportamiento observado en un sitio y que, por ende, es necesario hacer un análisis detallado en cada zona del planeta donde se observen. En ese sentido, las investigaciones sobre casos de estudio serán siempre interesantes y aportarán mucho al estado del conocimiento.

Entre otras cosas, la estructura espacial de los *seiches*, el tiempo que tarda un sistema en generar su estructura resonante, y los mecanismos presentes en la transferencia de energía de unas frecuencias a otras son motivo de investigación en la actualidad y, por consiguiente, hacen falta muchos trabajos en ese sentido. La modelación numérica es actualmente la manera más adecuada para resolver muchas de estas dudas. El avance en el conocimiento de estos aspectos de la resonancia depende, entonces, del avance en materia de modelación numérica.

### **3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA, OBJETIVOS Y ESTRUCTURA**

#### **3.1 Planteamiento del problema**

Como bien se describió en los capítulos anteriores, las *seiches* son ondas que generan problemas (en algunos casos catástrofes), en ciertas zonas semicerradas donde generan amplificación resonante. En el capítulo anterior se hizo una clasificación del estado del conocimiento sobre las *seiches* en varios aspectos. En términos generales se vio que, a medida que ha avanzado el conocimiento, la forma de resolver el problema de resonancia ha venido también adecuándose a los avances metodológicos en términos de análisis numérico y de análisis estadístico. Si bien todavía siguen usándose metodologías semiempíricas y a veces incompletas para caracterizar y resolver el problema de onda larga resonante, ahora es más o menos aceptada la metodología general para un problema de este tipo.

En primera instancia se evalúa si los períodos propios de oscilación de la dársena existen en el clima marítimo de la zona. En ese caso, se lleva a cabo un análisis de los mecanismos forzadores de las ondas con dichos períodos, con el fin de intentar predecir el comportamiento del sistema resonante. Se hace entonces un análisis de las series de datos de los diferentes mecanismos forzadores potenciales y se hace uso de formulaciones teóricas que intentan demostrar dicho forzamiento. Con el forzamiento identificado, es posible alimentar los modelos numéricos para determinar el comportamiento resonante de la dársena y validar las hipótesis. Es decir, el estudio se hace mediante técnicas de análisis de datos y modelación numérica.

En las metodologías de análisis de datos y de modelación numérica se han hecho grandes avances últimamente. Parece, entonces, no haber carencias en el estudio de *seiches* a partir de estas dos formas de atacar el problema.

Sin embargo, sí se evidencia una falta de investigaciones para identificar *seiches* en algunas partes del mundo. Los trabajos sobre casos de estudio serán siempre interesantes y aportarán mucho al estado del conocimiento. En particular aquellos que expliquen nuevos mecanismos forzadores de generación de *seiches*.

Por otra parte, es normal que antes de que se analicen las respuestas o consecuencias morfológicas generadas por cualquier fuerza, se identifique completamente el fenómeno que la genera. Es lógico pensar que, dado los recientes avances metodológicos en el estudio de los *seiches*, apenas se haya pensado en las consecuencias morfológicas que estas ondas generan en el litoral. En ese sentido, las carencias en el estado del conocimiento sí que son grandes.

En algunos casos, parece que existe una estrecha relación en algunas zonas donde se evidencian amplificaciones resonantes por *seiches* y una gran importancia ecológica. Tal es el caso de las bahías de Alfacs y Fangar en el delta del Ebro. En otras bahías deltaicas como las asociadas con el Ródano (Golfo de Fos) o con el Po (Sacca di Goro) también parece que ocurre lo mismo. Pero la relación entre riqueza ecológica y *seiches* también ha sido poco estudiada.

Por lo tanto, esta tesis se enfoca en tres aspectos fundamentales en el análisis de las *seiches*: 1) Identificación de las frecuencias resonantes observadas en las bahías de Alfacs y Fangar en el delta del Ebro, 2) Identificación y análisis de los mecanismos forzadores de esas *seiches*, ya sean atmosféricos o de plataforma (o ambos) y 3) Identificación de la posible relación entre las *seiches* y las características morfométricas de las bahías donde se propagan.

## **3.2 Objetivos de la tesis**

### **3.2.1 *Objetivo general***

Para responder a las cuestiones generadas por el problema de resonancia en las bahías naturales, es necesario plantear tres objetivos generales de la presente tesis. Se han escogido como bahías de análisis aquellas formadas por el delta del Ebro, Alfacs y Fangar. Sin embargo, se han seleccionado otras seis geoformas similares para verificar algunas hipótesis planteadas en la tesis, particularmente las relacionadas con el objetivo 3.

1. Conocer el comportamiento espacio-temporal e identificar los mecanismos forzadores de las ondas resonantes en las bahías de Alfacs y Fangar, para lo cual es tan necesario analizar los datos nivel del mar como modelar numéricamente el fenómeno.
2. Determinar el comportamiento espacio-temporal de los mecanismos forzadores de las ondas resonantes de las bahías analizadas, sean atmosféricos o de plataforma, o ambos.
3. Ampliar el conocimiento de las *seiches* en relación con las consecuencias morfológicas que puedan generar.

### 3.2.2 *Objetivos específicos*

Con el fin de cumplir este objetivo general, se han planteado los siguientes objetivos específicos:

1. Investigar el estado del conocimiento en relación con la resonancia portuaria y los mecanismos forzadores de ésta en bahías y ensenadas naturales del mundo y, en particular, del Mediterráneo.
2. Identificar, mediante análisis de datos, los modos resonantes de las bahías de Alfacs y Fangar y su comportamiento espacio-temporal.
3. Buscar, con técnicas de análisis de datos, los mecanismos forzadores de las ondas resonantes de dichas bahías.
4. Verificar, mediante modelación numérica, las hipótesis de los mecanismos forzadores de las ondas mencionadas en las bahías de Alfacs y Fangar.
5. Identificar y describir el comportamiento espacio-temporal de los mecanismos forzadores de las ondas resonantes de las bahías analizadas.
6. Relacionar las características de las ondas resonantes con las características morfométricas de las bahías de Alfacs y Fangar.
7. Establecer relaciones entre las características morfométricas de cierto tipo de bahías y las de las plataformas continentales donde se encuentran emplazadas.

Como puede inferirse de la lectura de cada uno de ellos, los objetivos específicos 1 a 4 están relacionados con el objetivo general 1, el objetivo específico 5 con el objetivo general 2 y los objetivos específicos 6 y 7 con el objetivo general 3.

### 3.3 Estructura de la tesis

La estructura general de esta tesis es la que se presenta a continuación:

#### ***3.3.1 Objetivo 1: Conocer el comportamiento espacio-temporal e identificar los mecanismos forzadores de las ondas resonantes en las bahías de Alfacs y Fangar, para lo cual es tan necesario analizar los datos nivel del mar como modelar numéricamente el fenómeno.***

El desarrollo de este objetivo partió del análisis de los datos de nivel del mar en las bahías de Alfacs y Fangar. Debido a que para onda larga no existen estudios capaces de determinar, de la misma manera que para onda corta, una función de ocurrencia de las características de las ondas en estas frecuencias así como un espectro tipo que permita simplificar el conjunto de datos, este análisis de datos se hizo tanto en el dominio del tiempo como de la frecuencia y la probabilidad de todos los registros. Además de ver el comportamiento temporal del nivel del mar, se hizo un análisis de Fourier en el que se identificaron las frecuencias de mayor energía y un análisis wavelet para ver el comportamiento temporal de esas frecuencias. La conclusión de este análisis fue la identificación de las frecuencias de mayor energía en los registros de nivel del mar en San Carles de la Ràpita y l’Ampolla, Alfacs y Fangar respectivamente.

Posteriormente y con el fin de verificar los modos resonantes de Alfacs y Fangar, se hizo una modelación numérica lineal, con un modelo que resuelve la Ecuación de la Pendiente Suave (MSP por sus siglas en inglés), a nivel local, en la que se introdujo como forzamiento ondas unitarias que muestran, en condiciones ideales de reflexión, la amplificación resonante en diferentes puntos del dominio espacial. Este análisis generó tres resultados. Por una parte, se identificaron los modos propios de oscilación de las bahías. Por otra, éstos se relacionaron con las frecuencias más energéticas identificadas en el punto anterior. Por último, esta

---

modelación trabajó sobre la capacidad predictiva del fenómeno en las bahías de Alfacs y Fangar, al conocer el comportamiento espacial de dichas ondas, mediante una herramienta numérica cuya capacidad de representar los fenómenos considerados es más que adecuada para este tipo de fenómenos.

A continuación se buscaron posibles mecanismos forzadores de las ondas identificadas en los registros y que coinciden con los modos propios de oscilación de las bahías. Tradicionalmente se han relacionado estas oscilaciones resonantes principalmente con ondas de baja frecuencia vinculadas a grupos de olas y a la generación de oscilaciones o *seiches* debido a ondas inducidas por perturbaciones atmosféricas. Por el período de estas ondas, observado en Alfacs y Fangar (~3.5 h y ~1.5 h, respectivamente), es de suponer que el mecanismo forzador sea el último. Las ondas infragravitatorias relacionadas con grupos de olas tienen períodos del orden de las decenas de minutos. Difícilmente se generan ondas de este tipo con mayores períodos.

En el caso de las perturbaciones atmosféricas, es lógico pensar que no sólo las variaciones temporales de las variables generen las consecuencias resonantes buscadas. En algunos casos, las variaciones espaciales, referidas fundamentalmente a la dirección y a la velocidad de incidencia, pueden ser importantes. En ese sentido, la búsqueda de los mecanismos forzadores partió del análisis de los registros de vientos y presión atmosférica. En el primer caso, la comparación se hizo en los mismos puntos donde se tienen registros de nivel del mar. En el segundo caso, se hizo una comparación de espectros de Fourier y *wavelet*, en las frecuencias de interés, así como una identificación de las condiciones espaciales de presión antes, durante y después de los momentos de mayor energía observados en las frecuencias resonantes de Alfacs y Fangar.

Posteriormente se analizaron los estados de tiempo atmosférico de escala sinóptica, representados mediante los gradientes de presión atmosférica en superficie en el Mediterráneo Occidental. Estos datos se relacionaron gráficamente con los eventos resonantes ocurridos durante 1999 en las dos bahías analizadas.

### **3.3.2 *Objetivo 2: Determinar el comportamiento espacio-temporal de los mecanismos forzadores de las ondas resonantes de las bahías analizadas, sean atmosféricos o de plataforma, o ambos.***

Aún cuanto la forma tradicional de abordar el problema se basa, en el caso de ondas largas con período mayor que el de las ondas asociadas con grupos de olas, en relacionar los mecanismos forzadores con perturbaciones atmosféricas, dadas las evidencias en las bahías del delta del Ebro, se ha buscado un mecanismo forzador intermedio. Para ello se analizaron los datos de nivel del mar en Valencia, Barcelona e Ibiza, y se hizo una modelación numérica de las condiciones impuestas por este tipo de ondas en el mar Balear. El modelo utilizado ha sido un modelo tipo MSP, que representa adecuadamente las características de los resultados buscados. El dominio espacial incluye el golfo de Valencia y el archipiélago Balear. La identificación de ese mecanismo forzador se ha basado, de nuevo, en el análisis de datos y la modelación numérica.

Por último, la complejidad del fenómeno de la resonancia en las bahías de Alfacs y Fangar, que incluye un mecanismo intermedio de plataforma entre el mecanismo generador y la amplificación resonante, requiere de una modelación que integre perfectamente los procesos no lineales que comúnmente ocurren durante los episodios resonantes. Por lo tanto, para verificar las hipótesis planteadas sobre los mecanismos forzadores primarios e intermedios, se hizo una modelación numérica no lineal con un modelo que resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes. En este modelo la aproximación hidrostática, la consideración de un movimiento barotrópico y la suposición de que las velocidades horizontales son constantes en vertical, reducen las ecuaciones de conservación de la masa y de cantidad de movimiento a las ecuaciones de onda larga integradas en vertical. De esta manera, con el forzamiento identificado, es posible alimentar al modelo numérico para determinar el comportamiento resonante de las bahías y validar las hipótesis planteadas.

### **3.3.3 *Objetivo 3: Ampliar el conocimiento de las seiches en relación con las consecuencias morfológicas que puedan generar.***

Con el fin de ver la influencia de las ondas resonantes en ciertas características morfométricas, se identificaron los modos propios de oscilación de 7 bahías en diferentes partes del mundo haciendo uso de los mismos modelos analíticos utilizados para verificar los resultados en Alfacs y Fangar. Los resultados se compararon gráficamente con los modos propios de oscilación de las plataformas continentales donde están localizadas las bahías. Las geoformas seleccionadas para el análisis tenían que cumplir varios aspectos: estar formadas por bocanas amplias, estar conformadas por materiales sueltos no cohesivos o de fácil erosión, estar localizadas en zonas donde se han observado ondas de plataforma.

Para poder desarrollar estos objetivos de la manera descrita, se ha estructurado la tesis de la siguiente manera:

#### **SECCIÓN I: MOTIVACIÓN, ESTADO DEL CONOCIMIENTO Y OBJETIVOS**

Capítulo 1: Introducción

Capítulo 2: Estado del conocimiento y revisión de otros estudios

Capítulo 3: Planteamiento del problema, objetivos y estructura de la tesis

#### **SECCIÓN II: ANÁLISIS DE OBSERVACIONES Y NUMÉRICO**

Capítulo 4: Análisis de datos de nivel del mar en Alfacs y Fangar

Capítulo 5: Modelación numérica de la resonancia en Alfacs y Fangar

#### **SECCIÓN III: MECANISMOS FORZADORES**

Capítulo 6: Análisis de los posibles mecanismos forzadores: viento

Capítulo 7: Análisis de los posibles mecanismos forzadores: presión atmosférica.  
Análisis temporal

Capítulo 8: Análisis de los posibles mecanismos forzadores: presión atmosférica.  
Análisis espacial

Capítulo 9: Análisis de los posibles mecanismos forzadores: ondas de borde

#### SECCIÓN IV: MODELADO NUMÉRICO DEL FORZADOR Y LA RESPUESTA

Capítulo 10: Simulación numérica de la presión atmosférica como mecanismo generador de la respuesta resonante en Alfacs y Fangar

#### SECCIÓN V: INFLUENCIA DE LAS ONDAS RESONANTES EN LA MORFODINÁMICA DE LAS BAHÍAS DONDE ACTÚAN

Capítulo 11: Consecuencias morfodinámicas de las ondas resonantes

#### SECCIÓN VI: CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Capítulo 12: Conclusiones y futuras líneas de investigación

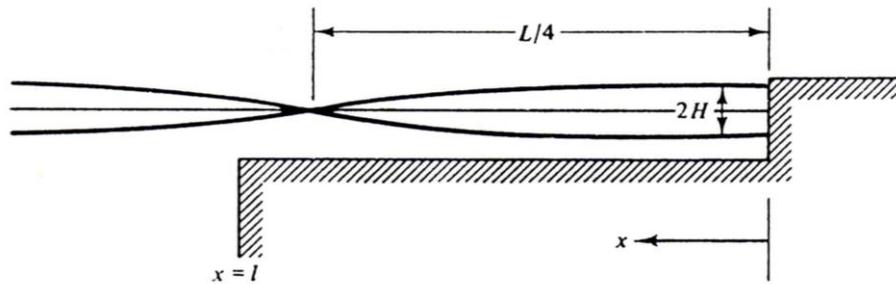
## **4. ANÁLISIS DE DATOS DE NIVEL DEL MAR EN ALFACS Y FANGAR**

### **4.1 Introducción**

Como se mencionó en el apartado 1.2, en la bahía de Alfacs, Delta del Ebro, se han observado desde hace tiempo oscilaciones de largo período en una frecuencia de ~3.3 horas (Camp, 1995), al igual que en la bahía de Fangar en frecuencias de ~1.5 horas. Aunque la carrera de marea en el mar Balear no supera 0.6 m, la magnitud de estas oscilaciones puede representar, en el extremo interior de las bahías, hasta el 100% de ese valor e incluso más. Estos eventos coinciden con los períodos propios de las dos bahías, lo que puede ser rápidamente comprobado si simplificamos la fórmula de “Merian” (Ec. 4.1) al caso de una dársena rectangular, unidimensional, de fondo plano, sin fricción y con pared vertical perfectamente reflejante (Figura 4.1):

$$T_n = \frac{4L}{(2n+1)\sqrt{gh}} \quad (4.1)$$

donde  $T$  es el período de la onda en segundos,  $L$  la longitud de la dársena en metros,  $g$  la aceleración de la gravedad,  $h$  la profundidad en metros y  $n$  se refiere al modo de oscilación ( $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ ). Para las características geométricas de la bahía de Alfacs ( $L = 18$  km,  $h = 3.5$  m), el primer modo ( $n = 0$ ) tendría un período resonante de  $T = 3.4$  h, el segundo modo es  $T = 1.1$  h y el tercero  $T = 0.7$  h. En el caso de Fangar ( $L = 7$  km,  $h = 3.0$  m), el primer modo de oscilación es  $T = 1.4$  h, el segundo es  $T = 0.5$  h y el tercero  $T = 0.3$  h.



**Figura 4.1** Oscilación de onda larga en un canal de longitud  $L$

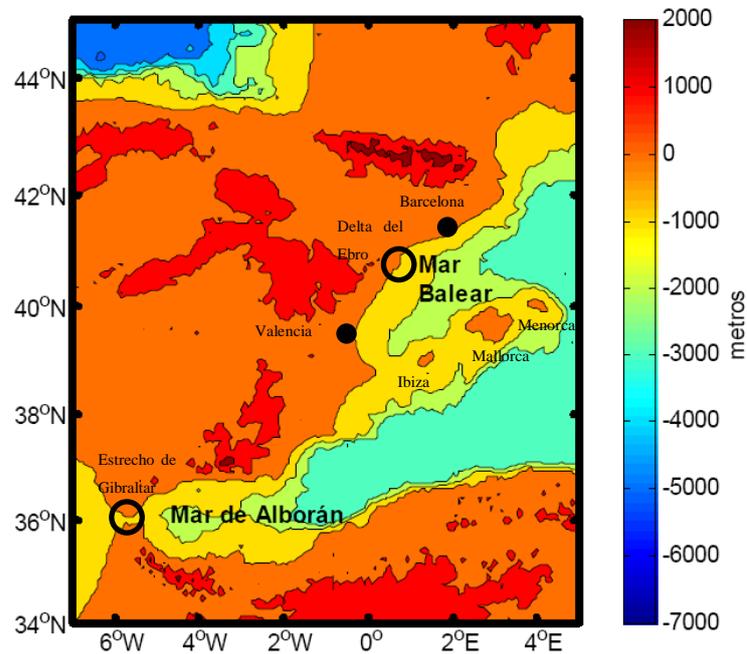
Según esta simple formulación, el problema de la resonancia en una dársena es puramente geométrico. En la naturaleza las cosas son diferentes. Por un lado, la amplitud resonante está limitada por diversos factores: la radiación de energía a la entrada de la dársena, las pérdidas por fricción con el fondo y los contornos, y la transferencia de energía a otras frecuencias. Por otra parte, áreas semicerradas como puertos, lagos y ensenadas, tienen geometrías más complejas. Para considerar todos estos efectos, normalmente se hace uso de modelos numéricos que consideran parámetros empíricos para estimar la reflexión y las pérdidas por fricción. De esta manera es posible determinar el período exacto de oscilación y la estructura espacial del mismo en un dominio real.

Con el objeto de comprobar las observaciones realizadas en las bahías de Alfacs y Fangar, se ha efectuado, en primera instancia, un análisis de datos de nivel del mar en el interior de las mismas, objeto del presente capítulo. Para ello, se describen las series de tiempo de nivel del mar en las bahías estudiadas, Alfacs y Fangar, y se hace un análisis estadístico y frecuencial de dichos registros. Previamente, y como punto de referencia, se describe el comportamiento espacio-temporal del nivel del mar en el Mediterráneo español, con especial énfasis en el mar Balear.

## **4.2 Análisis general del comportamiento del nivel del mar en el mar Balear**

En cuanto al comportamiento del nivel del mar, la zona atlántica de la península ibérica se encuentra en una situación de transición entre lo que ocurre en latitudes medias y el comportamiento de la franja tropical. Por un lado, ese comportamiento se debe a su localización y a las condiciones atmosféricas y las corrientes del Atlántico Norte, además de las que tienen su origen en las Azores y la zona subtropical (Tel, 2005). Por otra parte, el mar Mediterráneo está confinado en una cuenca relativamente pequeña en comparación con el Océano Atlántico, con un control del intercambio de los flujos de agua entre el Atlántico y el Mediterráneo a través del Estrecho de Gibraltar. Estas razones hacen que el Mar Mediterráneo tenga características micromareales.

A efectos de la caracterización del nivel del mar, el Mediterráneo español está compuesto por dos cuencas: el mar de Alborán y la cuenca catalana-balear o mar Balear. Esta última cuenca es donde se circunscribe el análisis de amplificación resonante de las bahías de Alfacs y Fangar, en el Delta del Ebro. La figura siguiente muestra la localización y la batimetría general del mar Mediterráneo español.



**Figura 4.2 Localización y batimetría del mar Mediterráneo español**

Modificado de Tel, 2005

El mar Balear se localiza en el margen nororiental de la península ibérica. Sus contornos emergidos lo constituyen la Cordillera Costero Catalana y el archipiélago balear. Morfológicamente, en esta cuenca se diferencian claramente tres elementos: 1) la plataforma continental, de anchura variable, que va desde la línea de costa hasta aproximadamente la isóbata de 200 m; 2) el talud continental, con pendientes entre 4° y 11°, localizado a partir de los 200 m de profundidad; y 3) la llanura abisal, con profundidades medias entre 2,700-2,800 m.

En general, en el mar Mediterráneo el nivel del mar cambia estacionalmente más de lo atribuible a la expansión/contracción termal (Larnicol et al, 1995), aparentemente como consecuencia del ciclo estacional de intercambio de flujos entre el Atlántico y el Mediterráneo a través del Estrecho de Gibraltar (Bormans y Garret, 1989; Garret et al., 1990). Las amplitudes de las mareas en la zona costera de esta cuenca varían en torno a 0.54 m en Valencia y alrededor de 0.63 m en Barcelona, tal como se mostró en el Capítulo 1.

En el mar de Alborán, las amplitudes de la marea pueden llegar a los 0.80 m, ligeramente superiores a los del mar Balear debido a una menor cercanía de este último con el intercambio de flujos entre el Atlántico y el Mediterráneo. También el mayor resguardo y la batimetría poco profunda de la cuenca analizada acentúan las mareas pequeñas en todo el dominio espacial de la misma. Como ilustración de esto, se presentan en la siguiente figura las amplitudes medias de la marea en algunos sitios donde Puertos del Estado tiene estaciones de la red REDMAR en el Mediterráneo.



**Figura 4.3 Amplitudes medias de marea en el mar Balear**

Imagen tomada de [www.puertos.es](http://www.puertos.es)

Como ya se mencionó, en las bahías de Alfacs y Fangar, en el Delta del Ebro, se han registrado ondas con períodos de  $\sim 3.3$  h y de  $\sim 1.5$  h, respectivamente, no consideradas normalmente en el análisis del nivel del mar del mar Balear. La magnitud de estas ondas no ha sido registrada aún, pero por observaciones visuales en el extremo interior de Alfacs, se estima que, además de un comportamiento aparentemente periódico, su amplitud puede llegar a 0.5 m en algunas ocasiones. Este valor es del mismo orden que las amplitudes

medias de la marea registradas en Valencia, Barcelona e Ibiza. Sin embargo, la existencia de estas ondas no se registra en los análisis de los datos de dichos mareógrafos, tal como se demuestra al ver los armónicos de la marea en Valencia (Figura 4.4).

Nivel del Mar / Sea Level			
Mareografo de Valencia / Valencia Tide Gauge ( 3652 )			
Armonicos de Marea / Harmonic Constituents			
calculados sobre el periodo 1996 - 2000 / Coverage 1996 - 2 000			
Codigo del Armonico Harmonic Id	Frecuencia Frequency (ciclos/hora)	Amplitud Amplitude (cm)	Fase Phase (°)
Z0	0.000000	105.64	0.00
Q1	0.037218	0.39	66.52
O1	0.038730	2.54	106.07
P1	0.041552	1.35	153.54
S1	0.041666	2.47	270.72
K1	0.041780	3.81	160.44
J1	0.043292	0.23	181.95
2N2	0.077487	0.08	184.01
N2	0.078999	0.44	184.13
M2	0.080511	1.78	195.65
T2	0.083219	0.16	324.82
S2	0.083333	0.55	139.02
MO3	0.119242	0.15	228.72
M3	0.120767	0.18	164.57
SK3	0.125114	0.15	194.37
MN4	0.159510	0.10	321.47
M4	0.161022	0.25	4.02
MS4	0.163844	0.17	69.58
SK4	0.166894	0.08	232.85
2SK5	0.208447	0.09	124.46
M6	0.241534	0.03	237.25
2MS6	0.244356	0.05	314.28

**Figura 4.4 Armónicos de marea en Valencia**

Tomado de [www.puertos.es](http://www.puertos.es)

El análisis normalmente realizado a las series de nivel del mar utiliza armónicos de marea asociados con ciertas frecuencias ya conocidas. En este caso, el análisis se ha hecho con 22 frecuencias, cuyo período mínimo está en torno a 4.1 h. Por eso, la descomposición en armónicos de la figura anterior no refleja las ondas observadas en Alfacs y Fangar. En ese caso, y a falta de análisis ya realizados sobre el tema, para corroborar las observaciones realizadas por Camp (1995) es necesario analizar datos de nivel del mar dentro de las mismas bahías, por lo que a continuación se presenta un detallado análisis de los registros de nivel del mar en ambas bahías, Afacs y Fangar.

### 4.3 Descripción de los datos de nivel del mar en Alfacs y Fangar

Con el fin de comprobar la existencia de *seiches* en las bahías de Alfacs y Fangar se han utilizado registros continuos de nivel del mar en el puerto de San Carlos de la Ràpita, MSCR, y en l’Ampolla, LAMP, respectivamente, entre 1997 y 2002 (Figura 4.5), datos que tienen una resolución temporal de 10 min. Los instrumentos utilizados hacen parte del programa llevado a cabo por el Servicio de Meteorología de Cataluña, el Departamento de Política Territorial y Obras Públicas de la Generalitat de Cataluña, Puertos de la Generalitat y el Laboratorio de Ingeniería Marítima de la Universidad Politécnica de Cataluña para el estudio de la evolución de la línea de costa del Delta del Ebro.

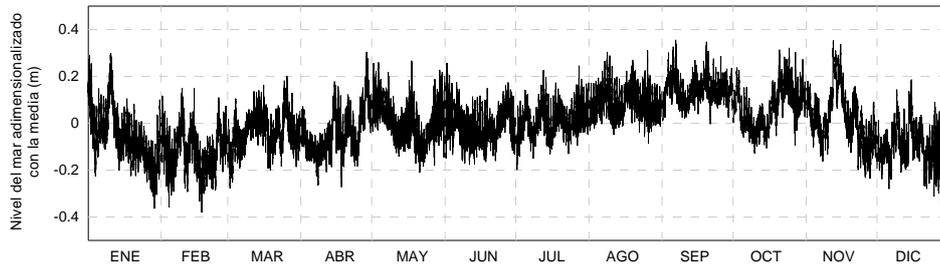
Si bien se tienen registros de nivel del mar de larga duración, se han escogido los datos de 1999 para el análisis debido a una mayor calidad de la serie durante este año. Los datos faltantes de estas series, el 0.23% del total, fueron rellenados con el promedio de los dos valores entre los cuales se encontraba el hueco. Posteriormente se hizo una criba para eliminar *outliers*, teniendo en cuenta que la variación de la marea no puede ser mayor de ocho centímetros en diez minutos.

La Figura 4.6 presenta los datos registrados en este período en San Carles de la Ràpita adimensionalizados con la media del año,

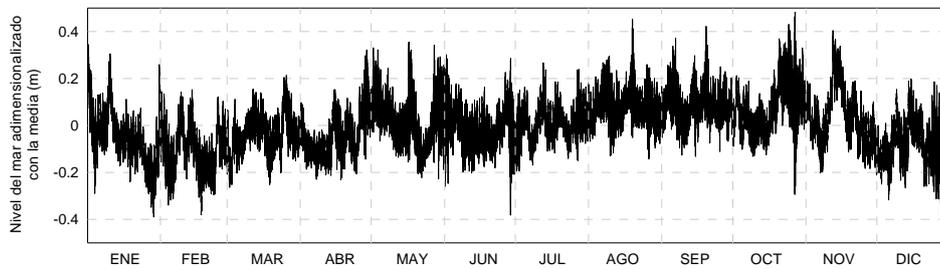
A simple vista se observa que la serie de nivel del mar en ambos sitios es periódica. Las componentes de la marea astronómica, fenómeno determinista, se pueden ver fácilmente. Véase, por ejemplo, la periodicidad de seis meses en las dos series (Componente Solar semianual,  $S_{sa}$ ) o la de 15 días en mayo (Componente lunar quincenal,  $M_f$ ). Sin embargo, también se nota un “ruido” en algunas épocas, claramente visible en la primera quincena de mayo y la última de diciembre. Esas perturbaciones indican la presencia de fenómenos estocásticos que deben ser analizados con más detalle.



**Figura 4.5 Localización y características de los mareógrafos de San Carlos de la Ràpita y l'Ampolla**



**Figura 4.6** Serie de nivel del mar en San Carles de la Ràpita en 1999

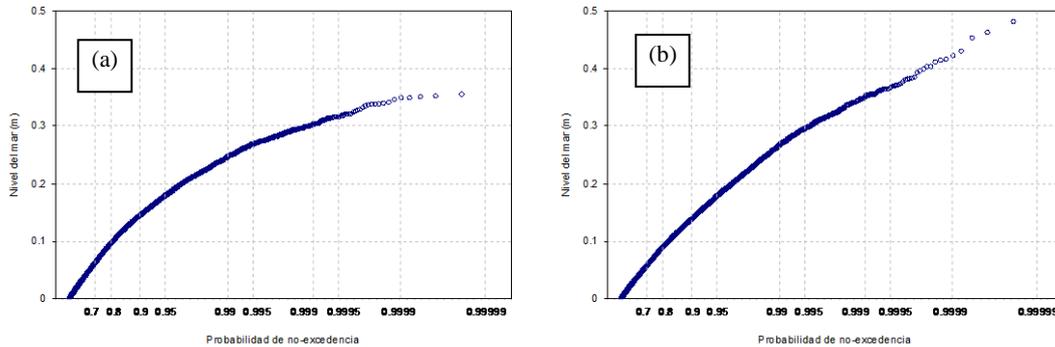


**Figura 4.7** Serie de nivel del mar en l'Ampolla en 1999

Un análisis complementario de los datos es el probabilístico. La Figura 4.8 muestra el régimen de probabilidades de dichas series. El ajuste se ha hecho a una función de distribución Gumbel de máximos, que se expresa mediante la función:

$$F(x) = P(X \leq x) = \exp\left(-\exp\left(-\frac{x-\lambda}{\delta}\right)\right) \quad (4.2)$$

En esa figura se puede notar con mucha facilidad que, en 1999, en ningún caso las sobrelevaciones de nivel del mar registraron más de 0.4 m en San Carles de la Ràpita y más de 0.5 m en l'Ampolla.



**Figura 4.8 Régimen de probabilidad del nivel del mar en (a) San Carles de la Ràpita y (b) l'Ampolla en 1999**

Como se vio en las figuras 4.6 y 4.7, la similitud temporal entre las series de nivel del mar de San Carles de la Ràpita y l'Ampolla es evidente. Lo que llama la atención es la diferencia entre los regímenes medios de probabilidad (Figura 4.8). Las componentes armónicas deben ser muy similares. Pareciera, entonces, que la marea meteorológica tuviera algunas características diferentes entre ambos sitios, probablemente una influencia distinta del mismo fenómeno o distintos fenómenos actuando de manera diferente en cada sitio. Dada la cercanía espacial de las bahías donde se encuentran localizados los mareógrafos, es más fácil creer en la primera opción. En todo caso, los fenómenos a los que se refiere la discusión son de tipo aleatorio.

Precisamente esa naturaleza aleatoria identificada en las series obliga a que antes de continuar con el análisis sea necesario verificar la calidad estadística de las series. Con el fin de garantizar que la serie analizada presente un comportamiento estadísticamente creíble, sin saltos que puedan influir en el análisis de los resultados, se realiza un análisis de homogeneidad que consiste en revisar si la serie presenta cambios en la media o en la varianza. Para esto se aplicaron pruebas no paramétricas que fueran independientes de la distribución probabilística de los datos. Para la evaluación de saltos en la media se utilizó la prueba de Wilcoxon o Suma de Rangos y para cambio en la varianza la prueba de Levene.

En ambas pruebas, la hipótesis inicial propone que no hay cambios en media o varianza respectivamente. Si la prueba no puede rechazar la hipótesis se concluye que no hay cambio. Estas pruebas fueron realizadas para un nivel de significancia del 5%.

En la tabla siguiente se presentan los parámetros estadísticos de las series de nivel del mar en San Carles de la Ràpita y l'Ampolla, y los resultados de las pruebas estadísticas realizadas para evaluar cambios significativos en la media o en la varianza.

**Tabla 4.1. Parámetros estadísticos y análisis de calidad de la serie de nivel del mar de San Carles de la Ràpita y l'Ampolla**

<b>Parámetros</b>	<b>San Carles de la Ràpita</b>	<b>l'Ampolla</b>
Cantidad de datos	52560	52560
Media (m)	2.55	2.10
Máximo (m)	2.90	2.59
Mínimo (m)	2.17	1.72
Desviación (m)	0.11	0.11
Cambio en la media	Salto en la media desde agosto	Salto en la media desde agosto
Cambio en la varianza	No hay cambio en la varianza	No hay cambio en la varianza

Si bien las pruebas arrojaron un salto en la media en el mes de agosto, la longitud de la misma (Un año) y los resultados tan bajos de significancia estadística de la prueba permiten suponer que este salto se debe más a las condiciones de verano e invierno que influyen de forma diferente en los períodos ENE-AGO y AGO-DIC, que a cambios reales de la serie que impliquen descartar los datos.

Por lo tanto, una vez verificada la calidad de las series, se puede concluir que no se han encontrado cambios en la media o la varianza estadísticamente significativas. Esta conclusión es válida tanto para la serie analizada como para todas las componentes de ella. Es decir, eliminando las componentes deterministas, es posible concentrar el análisis en las

componentes puramente estocásticas, cuya homogeneidad y calidad también se da por descontada. En este caso, esa componente estocástica es la marea meteorológica.

Lo que se debe estudiar ahora es la naturaleza del fenómeno que se representa en esa serie. A continuación se hace un análisis de las frecuencias con mayor energía y posteriormente un estudio de la periodicidad de las mismas, si la tienen, mediante técnicas de Fourier y *wavelet*, respectivamente.

#### **4.4 Análisis espectral del nivel del mar en las bahías de Alfacs y Fangar**

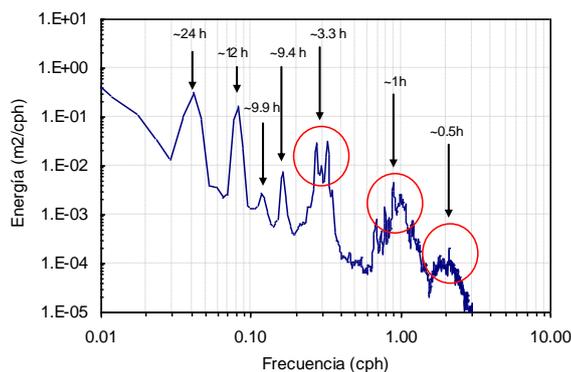
Uno de los objetivos planteados en esta investigación es verificar, mediante el análisis de datos, que sí existe un comportamiento resonante en las bahías de Alfacs y Fangar. En este apartado se demuestra la existencia de esa respuesta resonante. Es decir, se identifican los modos principales de oscilación de ambas bahías mediante un análisis espectral de Fourier de la señal de nivel del mar.

Esta, como cualquier señal, puede ser expresada como la combinación lineal de funciones sinusoidales con amplitud (A), frecuencia (f) y fase (F). La ventaja de descomponer series de tiempo de esta manera es que se obtiene la energía asociada a cada frecuencia de todas las posibles frecuencias que tiene la señal original. El análisis espectral de Fourier es una herramienta que permite, entonces, determinar las frecuencias principales de un registro. Con esta técnica es posible obtener los armónicos que definen el comportamiento medio de la señal analizada. Es decir, mediante el análisis espectral de Fourier es posible identificar rápida y fácilmente los modos resonantes de las bahías de Alfacs y Fangar.

Se ha realizado un análisis de 512 puntos, tanto para la serie de nivel del mar de 1999, con registros cada 10 minutos (52560 datos), como para las series de cada mes del mismo año;

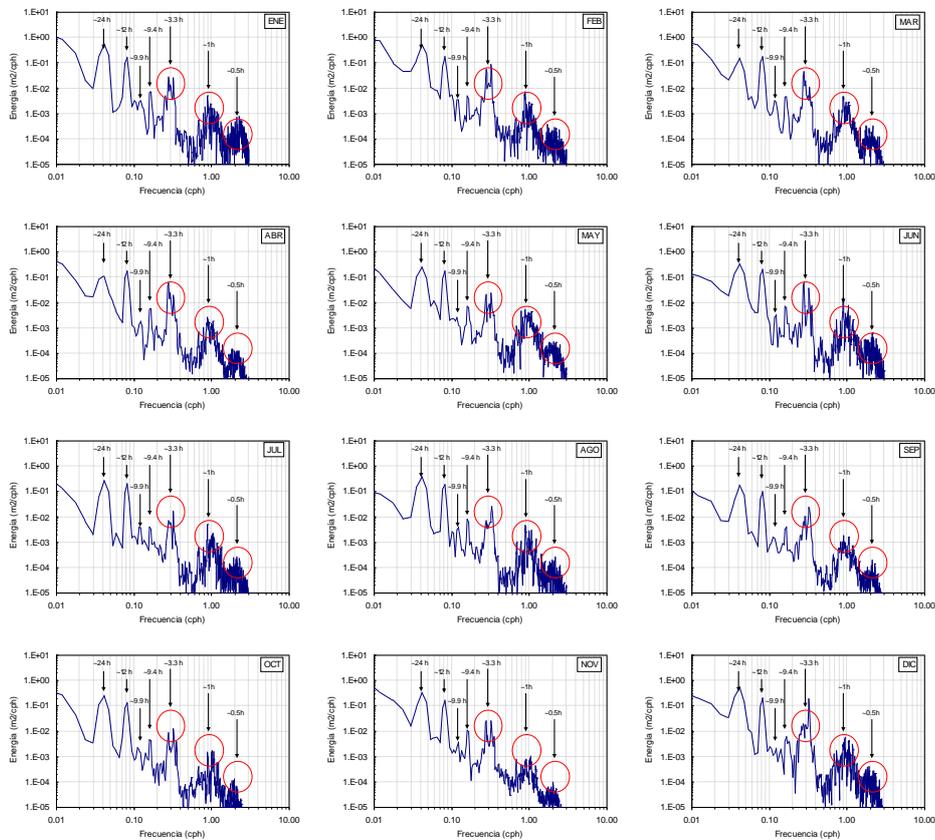
dichos resultados se presentan en las Figuras 4.9 y 4.10 para los datos de Alfacs y en las Figuras 4.11 y 4.12 para Fangar.

En todos los espectros obtenidos de los registros de Alfacs son claramente notorios los picos de las componentes principales de la marea astronómica, pero también muestran una gran energía algunos picos que se observan alrededor de 3.3 h, 1 h y 0.5 h, siendo mucho más energético el primero (Figura 4.9). Estos picos están asociados a los tres primeros modos resonantes de la bahía de Alfacs, coincidiendo con los resultados registrados por observación directa. Es particularmente llamativo que haya dos picos alrededor de 3.3 h, uno en 3.6 h y otro en 3.1 h, claramente diferenciados y con un comportamiento mensual diferente, tal como se verá más adelante.

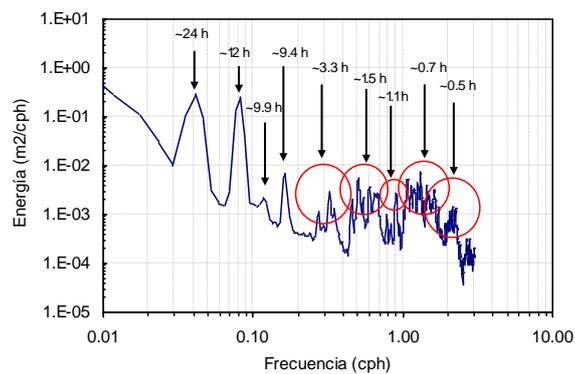


**Figura 4.9 Espectro de Fourier de la serie de nivel del mar de 1999 en San Carles de la Ràpita, bahía de Alfacs**

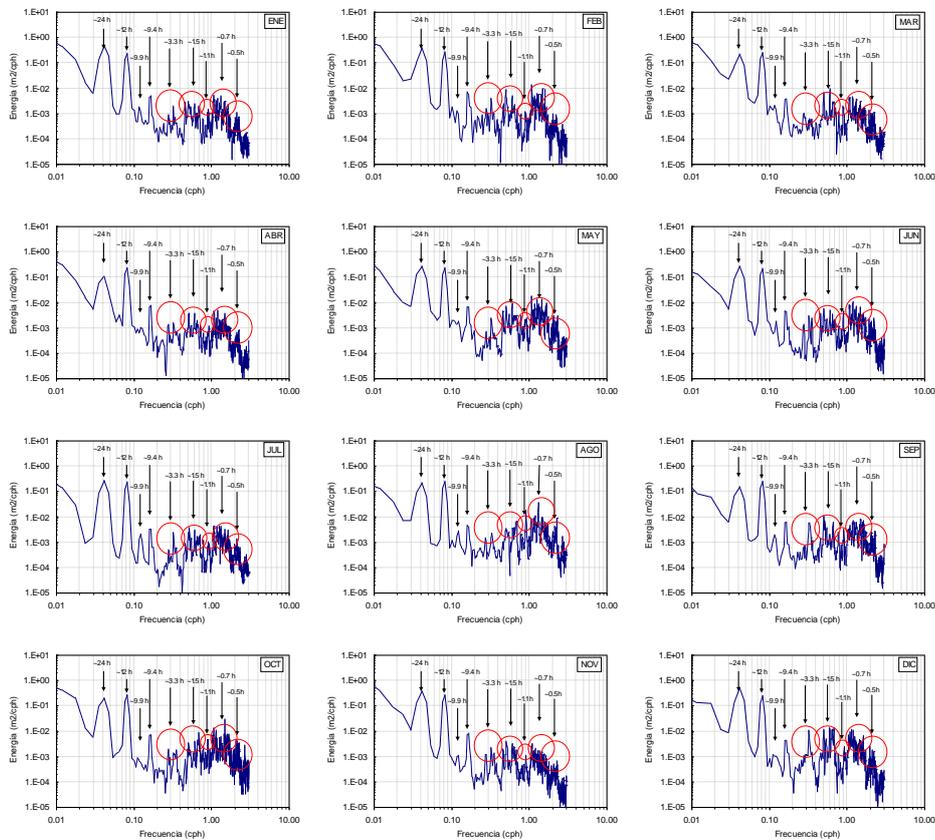
Al igual que en Alfacs, en la bahía de Fangar se aprecian claramente, además de los picos de las componentes principales de la marea astronómica, una alta energía alrededor de 1.5 h, 0.7 h y 0.5 h (Figura 4.11). Estos pueden estar relacionados con los tres modos principales de oscilación de la bahía. Si bien se observa también un pico alrededor de 3.3 h y otro en torno a 1.1 h, tal como se aprecia en Alfacs, la energía de éstos no es tan alta en Fangar. Nótese que en este caso, la energía de los dos primeros picos energéticos (1.5 h y 0.7 h) es muy similar; no hay uno de ellos que sea claramente dominante.



**Figura 4.10 Espectro de Fourier de las series mensuales de nivel del mar de 1999 en San Carles de la Ràpita, bahía de Alfacs**



**Figura 4.11 Espectro de Fourier de la serie de nivel del mar de 1999 en l'Ampolla, bahía de Fangar**



**Figura 4.12 Espectro de Fourier de las series mensuales de nivel del mar de 1999 en l’Ampolla, bahía de Fangar**

En ambos sitios estos modos se observan durante todo el año, aunque con una concentración mayor de la energía en los meses de invierno para todas las frecuencias. En los meses de primavera, en cambio, la componente de 3.3 h, modo principal de Alfacs, disminuye su energía en l’Ampolla, mientras que en San Carles de la Ràpita ésta se mantiene aproximadamente constante a lo largo del año, aunque con un ligero decrecimiento en verano. La onda de 1.5 h de período, que coincide con el modo principal de Fangar, también es un poco menos fuerte en primavera.

Este comportamiento aparentemente estacional invita a pensar que el fenómeno resonante en las bahías estudiadas está directa o indirectamente relacionado con causas o mecanismos de origen atmosférico, aspecto que será discutido con más detalle en capítulos posteriores.

## **4.5 Análisis de la evolución temporal de la energía (análisis *wavelet*) de nivel del mar en Alfacs y Fangar**

### **4.5.1. Teoría**

La desventaja que tiene el análisis espectral de Fourier es que con esa herramienta se asume que los estadísticos de las series de tiempo permanecen constantes a lo largo del tiempo. En nuestro caso, es necesario determinar tanto los modos dominantes de la serie de nivel del mar como su variabilidad en el tiempo. Entonces, con el objetivo de observar la evolución en el tiempo de la energía de los eventos de *seiche* identificados mediante el análisis de Fourier, se ha llevado a cabo un análisis *wavelet* de las series de nivel del mar. Esta técnica fue desarrollada por Morlet et al. (1982) para facilitar el análisis de registros de prospecciones petrolíferas, basado en el análisis en el dominio del tiempo-frecuencia. Es decir, esta técnica de análisis transforma los datos originales del dominio del tiempo al dominio tiempo-frecuencia.

Básicamente, la transformada *wavelet* expresa el grado de correlación existente entre una función “madre” y la señal. El tipo de función “madre” condiciona, por tanto, el patrón de comportamiento que se quiere identificar en la serie de tiempo analizada. Existen muchas funciones “madre”, con diferentes características. En este caso, el análisis se ha basado en la función “Morlet”, que se define como el producto de una función sinusoidal y una función gaussiana. Esta función madre, en términos del dominio del tiempo, se puede expresar como (Torrence y Compo, 1997; Liu, 2000; Massel, 2001):

$$\psi_0 = \pi^{-1/4} \left( e^{-imt} - e^{-m^2/2} \right) e^{-t^2/2} \quad (4.2)$$

donde  $m$  es la frecuencia adimensional, supuesta para este análisis como  $m = \pi\sqrt{2/\ln 2}$ . La función Morlet es simétrica para su componente real y asimétrica para su componente imaginaria. El valor que presenta la amplitud, primero creciente y luego decreciente para ambas componentes, parece ser adecuada para representar el comportamiento de las ondas resonantes en un cuenco de agua.

A la transformada *wavelet* se llega partiendo de la transformada de Fourier:

$$\hat{X}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(t) e^{-i\omega t} dt \quad (4.3)$$

donde  $\omega$  es la frecuencia de la serie de senos y cosenos que se aproxima para reconstruir la señal  $X(t)$ . Es decir, se realiza una transformación de la serie original del espacio del tiempo al espacio de la frecuencia.

Para analizar el comportamiento de la señal, simultáneamente en el espacio del tiempo y la frecuencia, se realiza una convolución de la ecuación (4.2) con una función  $g(t)$ , es decir:

$$\hat{X}(\omega, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(t) g(t - \tau) e^{-i\omega t} dt \quad (4.4)$$

que se conoce como la transformada de corto intervalo de Fourier y se puede discretizar en el tiempo  $\tau$  y en la frecuencia  $\omega$  como  $a\tau_0$  y  $b\omega_0$ , respectivamente, donde  $a > 0$ ,  $-\infty < b < +\infty$  y  $\tau_0, \omega_0 > 0$ . Entonces, la ecuación queda:

$$\hat{X}(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(t) g_{a,b}(t) dt \quad (4.5)$$

donde:

$$g_{a,b}(t) = g(t - a\tau_0) e^{-ib\omega_0 t} \quad (4.6)$$


---

El parámetro  $a$  controla la magnitud de la función  $g_{a,b}(t)$  y el parámetro  $b$  controla la posición de la ventana. La función  $g_{a,b}(t)$  se puede sustituir, entonces, por la familia de funciones denominadas *wavelets*:

$$\psi_{a,b} = |a|^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (4.7)$$

donde  $|a|^{-1/2}$  es un factor de normalización (Liu, 2000). Así, la ecuación (4.3) queda:

$$\hat{X}(a,b) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(t) |a|^{-1/2} \psi^* \left( \frac{t-b}{a} \right) dt \quad (4.8)$$

donde el asterisco significa la conjugada compleja de la *wavelet* madre. Por lo tanto, una familia de funciones de la ecuación (4.5) se obtiene mediante el escalado, con el parámetro  $a$ , y el desplazamiento de la función en la serie, mediante el parámetro  $b$ , de una función base  $\psi(t)$  denominada función madre.

Esta función debe cumplir una serie de condiciones, como la condición de admisibilidad expresada como:

$$C_\psi = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\hat{\psi}(\omega)|}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (4.9)$$

y la condición de continuidad y diferenciabilidad expresada como:

$$\hat{\psi}(t) \Big|_{\omega=0} = \int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (4.10)$$

A partir de esto, una señal dada  $X(t)$ , se puede obtener a partir de una función madre  $\psi_{a,b}$  y la transformada *wavelet*  $\tilde{X}(a,b)$  mediante:

$$X(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{X}(a,b) \psi(t) \frac{dad b}{a^2} \quad (4.11)$$

De la misma manera que se hace para la transformada de Fourier, se define la energía total de la señal como:

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} X(t)^2 dt = \frac{1}{C_{\psi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{X}(s, \tau) \tilde{X}^*(s, \tau) ds d\tau \quad (4.12)$$

y el espectro *wavelet* como:

$$Wx(s, \tau) = \frac{1}{C_{\psi}} |\tilde{X}(s, \tau)|^2 \quad (4.13)$$

El promedio del espectro *wavelet* en el período de observación es el espectro de Fourier.

Una descripción más detallada de las características y las propiedades de este tipo de transformada puede ser encontrada en Torrence y Compo (1997), Liu (2000) y Massel (2001).

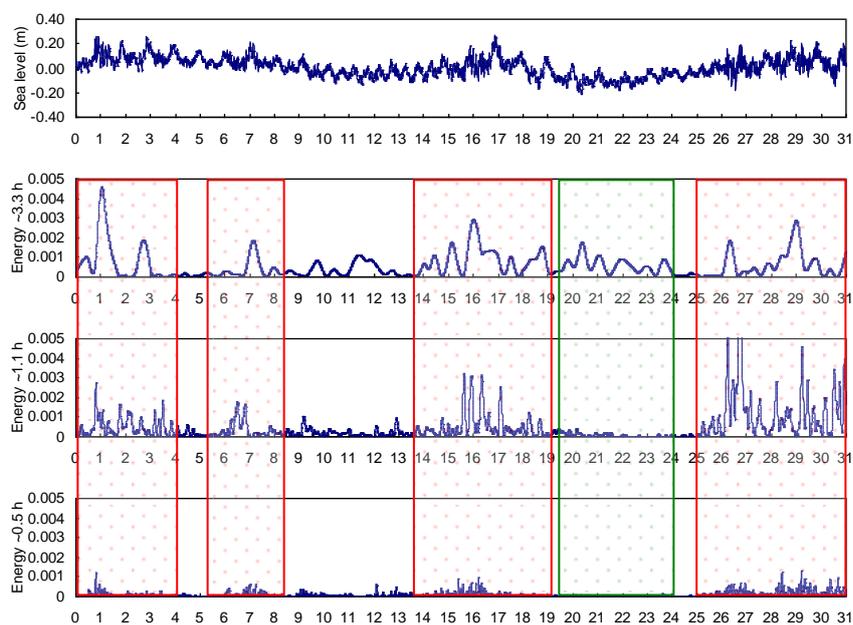
### 4.5.2. Análisis de datos

Mediante el análisis *wavelet* se estimó, mes a mes, la variación temporal de la energía contenida en las ondas resonantes principales de ambas bahías, Alfacs (T=3.3 h, T=1.1 h y T=0.5 h) y Fangar (T=1.5 h, T=1.1 h, T=0.7 h y T=0.5 h), identificadas previamente en el análisis de Fourier realizado a las series de nivel del mar de San Carles de la Ràpita y l'Ampolla. A continuación se presentan estos resultados.

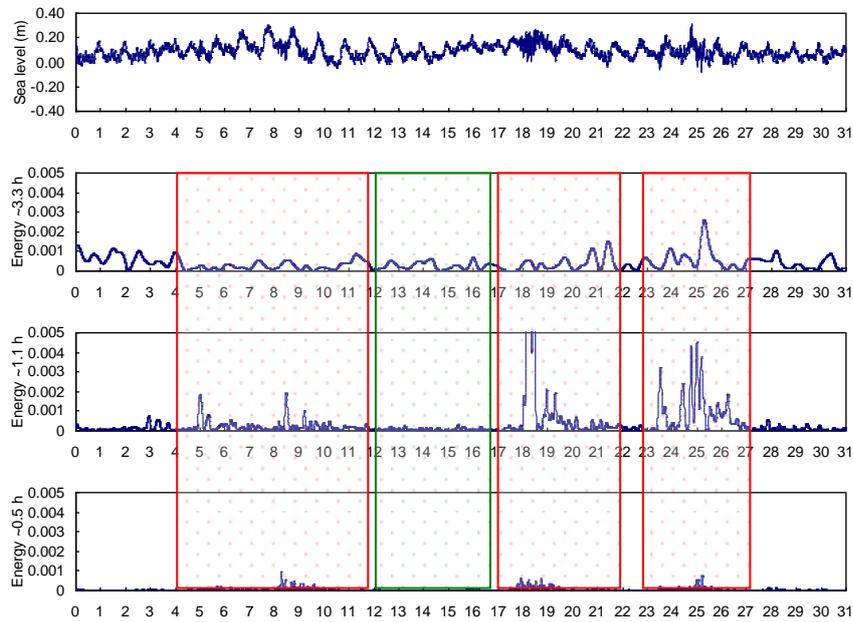
En las gráficas se han marcado, en rojo, los períodos de tiempo coincidentes entre las frecuencias analizadas, y en verde los períodos en los que existe alguna duda sobre la coincidencia entre cualquiera de las frecuencias.

- **Bahía de Alfacs**

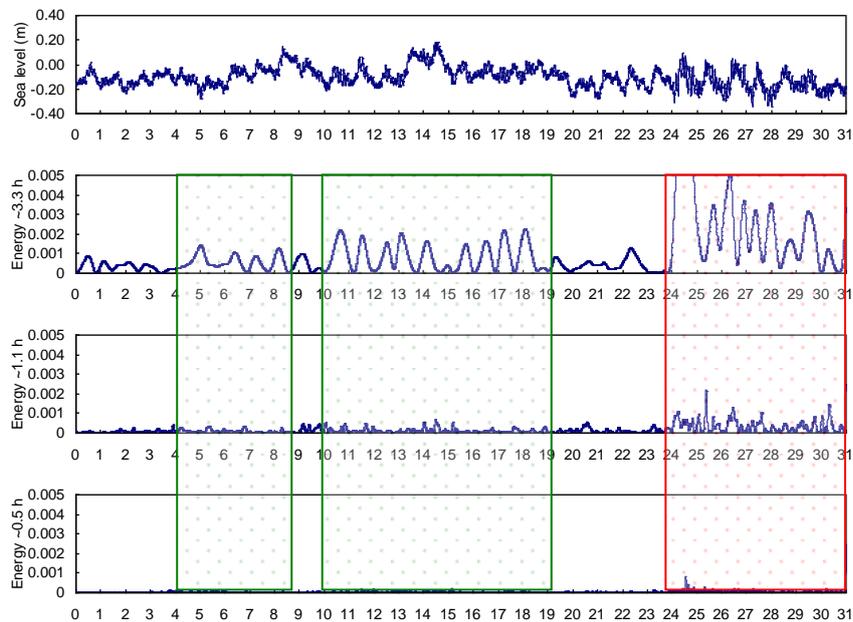
A continuación se presentan los resultados de este análisis para los registros de nivel del mar en San Carles de la Ràpita, bahía de Alfacs. Se presenta el análisis de tres meses típicos (mayo, agosto y diciembre); los demás resultados se muestran en el Anexo 1.



**Figura 4.13** Variación temporal de la energía en los modos resonantes durante el mes de MAYO de 1999 en San Carles de la Ràpita, bahía de Alfacs



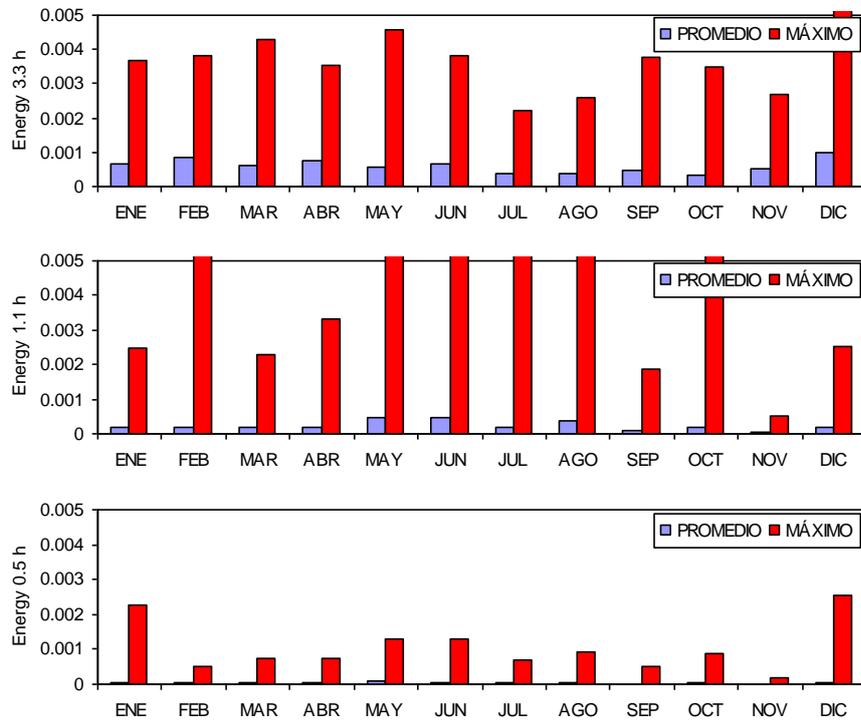
**Figura 4.14** Variación temporal de la energía en los modos resonantes durante el mes de AGOSTO de 1999 en San Carles de la Ràpita, bahía de Alfacs



**Figura 4.15** Variación temporal de la energía en los modos resonantes durante el mes de DICIEMBRE de 1999 en San Carles de la Ràpita, bahía de Alfacs

El análisis *wavelet* se ha realizado para toda la serie de datos de nivel del mar. Se ha obtenido la variación en el tiempo de la energía del nivel del mar en las frecuencias del primer ( $T=3.3$  h), el segundo ( $T=1.1$  h) y el tercer modo de oscilación ( $T=0.5$  h). De un primer análisis de esta información se pueden obtener varias conclusiones:

- La respuesta resonante de la bahía de Alfacs no es un fenómeno esporádico.
- La onda de 3.3 h parece estar presente en los registros de nivel del mar de San Carles de la Ràpita, bahía de Alfacs durante todo el año, con eventos más energéticos cada cierto tiempo (entre 4 y 10 días), no así la de 1.1 h que parece ser más episódica su ocurrencia.
- La energía de 3.3 h es mucho más alta que la de los modos de 1.1 h y 0.5 h. Este último modo definitivamente es irrelevante en cuanto a magnitudes se refiere. En adelante el análisis de esta onda de 0.5 h de período se omitirá por esta razón.
- Si bien la ocurrencia de los eventos más energéticos del modo de 3.3 h parecen estar relacionados con los mismos eventos de 1.1 h, esta concordancia no siempre se observa. En mayo es más clara que en agosto, por ejemplo.
- Desde agosto hasta septiembre del año analizado, apenas se observó energía en la frecuencia de 3.3 h, al igual que en la frecuencia de 1.1 h. No obstante, de esta última se apreciaron algunos episodios muy marcados.
- El comportamiento de estas ondas de 3.3 h de período está claramente influenciado por los trimestres estacionales DEF, MAM, JJA, SON, ligeramente más fuerte y frecuente en los meses fríos, y menos intenso y frecuente en los meses del verano del hemisferio norte, tal como lo demuestra la siguiente gráfica, en la que se muestran los valores medios y máximos mensuales de la energía en los dos modos de oscilación principales de la bahía de Alfacs.

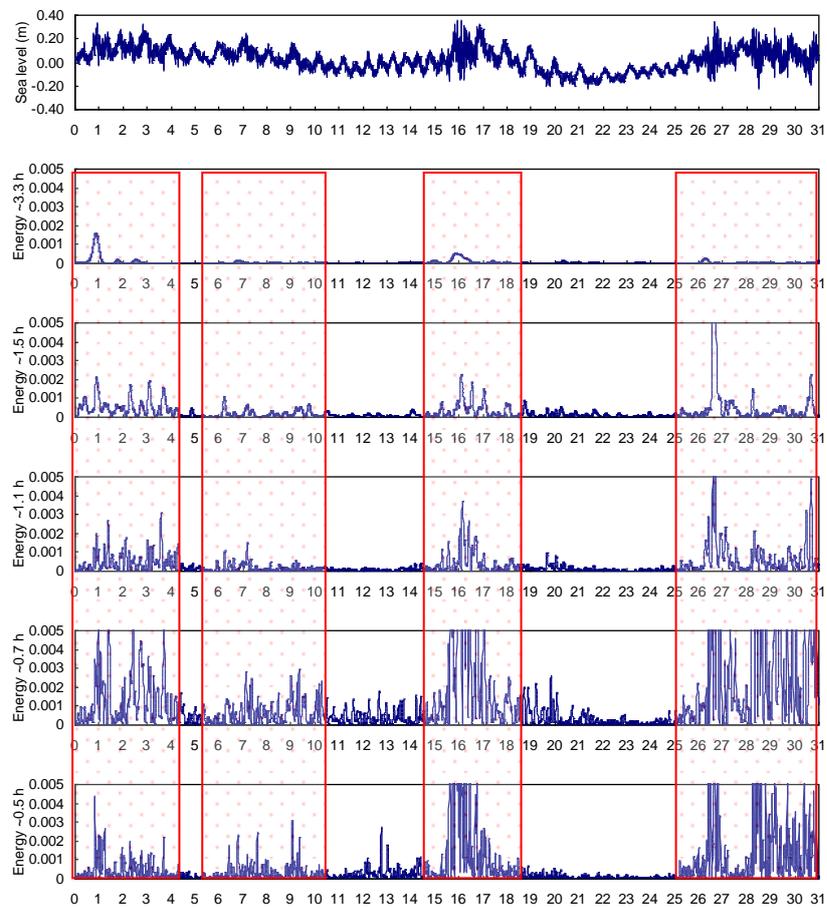


**Figura 4.16 Variación mensual de la energía en los modos resonantes durante los meses de 1999 en Alfacs**

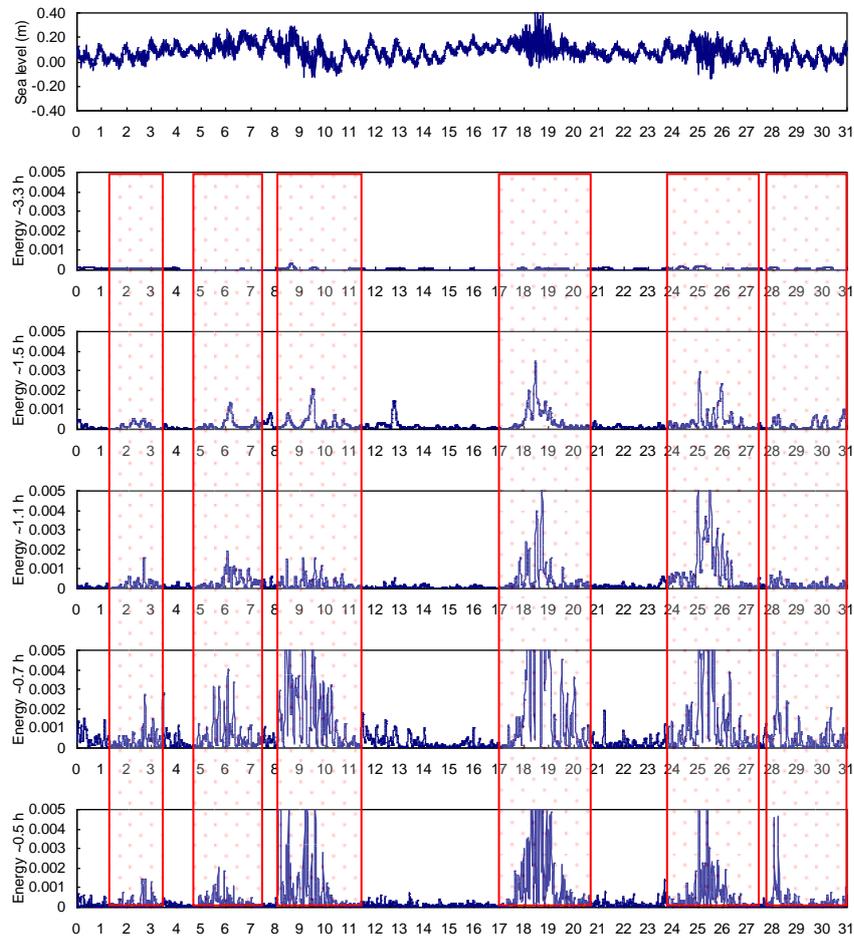
- Las ondas de  $T=1.1$  h son más esporádicas y se aprecian con mayor frecuencia y energía en JJA, lo que denota una falta de correlación entre la ocurrencia de ambos eventos, 3.3 h y 1.1 h.

- **Bahía de Fangar**

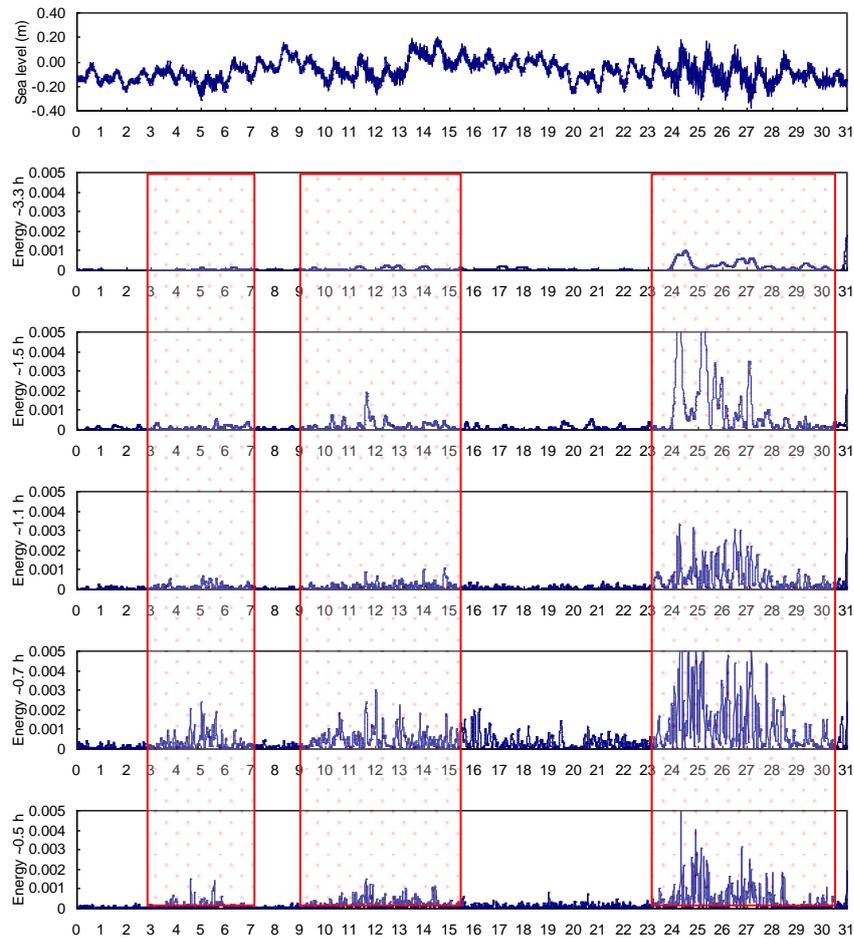
A continuación se presentan los resultados de este análisis para los registros de nivel del mar en l’Ampolla, bahía de Fangar. Se presenta el análisis de los mismos meses que se analizaron con detalle para la bahía de Alfacs (mayo, agosto y diciembre); los demás resultados se muestran en el Anexo 1.



**Figura 4.17** Variación temporal de la energía en los modos resonantes durante el mes de MAYO de 1999 en l’Ampolla, bahía de Fangar



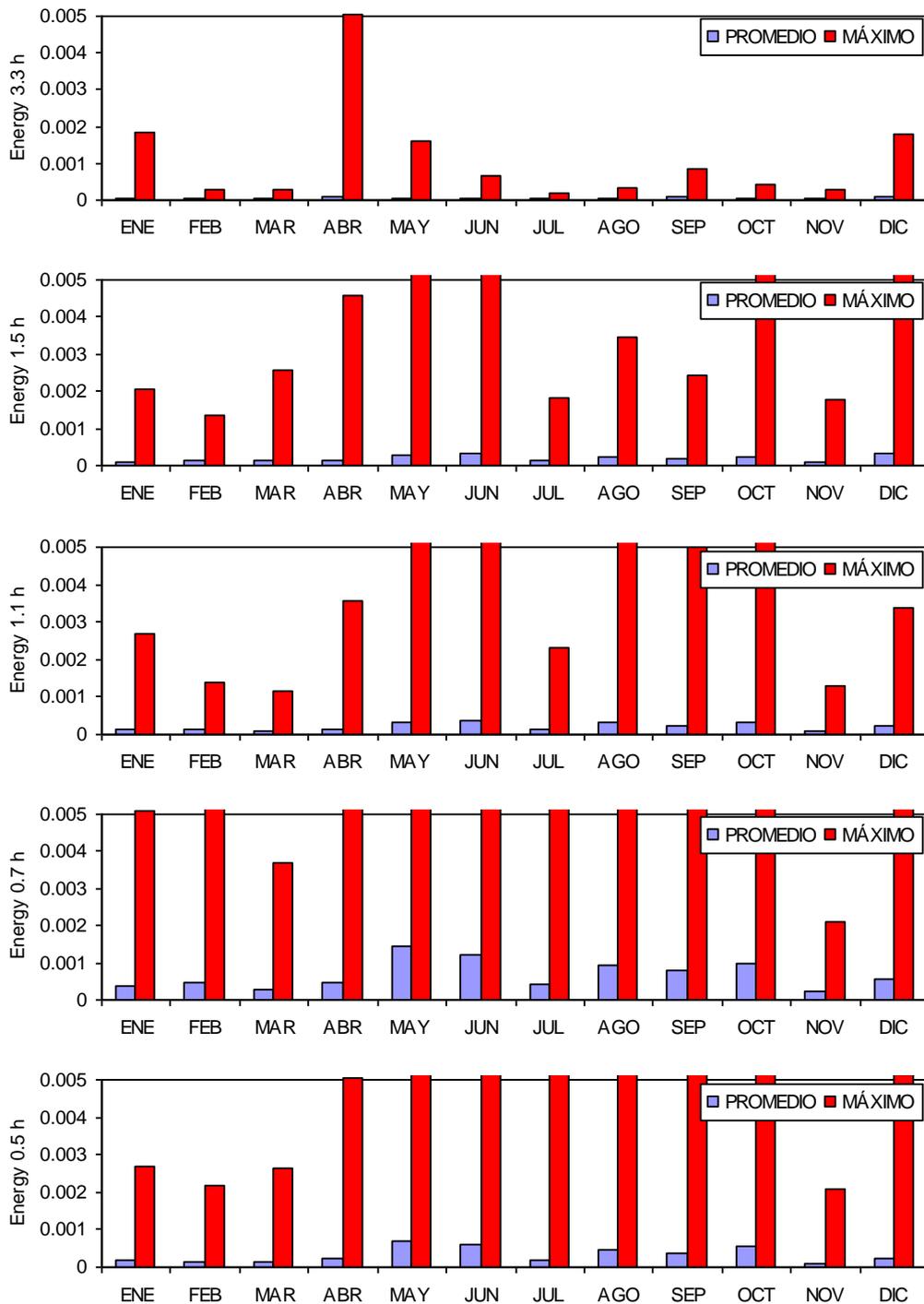
**Figura 4.18** Variación temporal de la energía en los modos resonantes durante el mes de AGOSTO de 1999 en l'Ampolla, bahía de Fangar



**Figura 4.19 Variación temporal de la energía en los modos resonantes durante el mes de DICIEMBRE de 1999 en l’Ampolla**

Al igual que para los registros de nivel del mar de la bahía de Alfacs, para los registros de nivel del mar de l’Ampolla, en la bahía de Fangar, se ha realizado un análisis *wavelet* para toda la serie de datos de 1999. Se ha obtenido la variación en el tiempo de la energía del nivel del mar en diferentes frecuencias asociadas a una alta energía observada en el análisis de Fourier ( $T=1.5$  h,  $T=1.1$  h,  $T=0.7$  h y  $T=0.5$  h); a modo de comparación con los resultados obtenidos en Alfacs, se ha incluido en el análisis la variación de la energía de la frecuencia de 3.3 h. De un primer análisis de esta información se pueden obtener varias conclusiones:

- La respuesta resonante de la bahía de Fangar tampoco es un fenómeno esporádico.
- Las cuatro ondas, que se han relacionado con los principales modos de oscilación de la bahía ( $T=1.5$  h,  $T=1.1$  h,  $T=0.7$  h y  $T=0.5$  h), parecen estar relacionadas en el tiempo, esto es, ocurren siempre a la misma vez.
- La energía de estas cuatro frecuencias es similar en magnitud en todos los episodios analizados. La onda de 3.3 h, también observada en Alfacs, está relacionada en el tiempo con estas otras, pero en magnitud su valor es irrelevante en Fangar.
- Parece haber una modulación de entre 4 y 10 días en la ocurrencia de los eventos resonantes, mucho más clara en estos registros que en los de la bahía de Alfacs.
- En general, se observa una mayor energía durante el período comprendido entre mayo y octubre en todas las frecuencias, exceptuando la de 3.3 h.
- La existencia de una concordancia en el tiempo de los eventos resonantes observados en Alfacs y Fangar permite concluir que las causas que los generan son de carácter regional y no local. Están asociados a procesos que pasa en la plataforma, más allá de lo que ocurre en cada una de las bahías, no obstante las diferencias en magnitud observadas entre uno y otro sitio en cada una de las frecuencias analizadas.



**Figura 4.20** Variación mensual de la energía en los modos resonantes durante los meses de 1999 en l’Ampolla, bahía de Fangar

## 4.6 Conclusiones

Con respecto a este capítulo, se pueden obtener las siguientes conclusiones:

Mediante observación directa, se ha encontrado una onda resonante en  $T \sim 3.3$  h en la bahía de Alfacs (en San Carles de la Ràpita). Dicha onda se aprecia también en el espectro de energía de la serie de nivel del mar de l'Ampolla, siendo mucho más energética en la primera. La respuesta resonante de Alfacs ante esta onda se observa durante todo el año, aunque con períodos de mayor energía (DEF, MAM).

En los mismos espectros de energía se han observado dos ondas más que coinciden en los dos sitios y que normalmente no se aprecian con tanta magnitud en los registros de los demás mareógrafos de la costa mediterránea española. Estas ondas, con períodos de  $\sim 1.1$  h y  $\sim 0.5$  h, son de menor energía que la de  $T \sim 3.3$  h en Alfacs pero de mayor energía en Fangar. La respuesta resonante de ambas bahías ante estas ondas parece ser esporádica, aunque con una frecuencia de ocurrencia de entre 4 y 10 días.

En general, estas tres ondas ( $\sim 3.3$  h,  $\sim 1.1$  h y  $\sim 0.5$  h) observadas en los registros de nivel del mar de ambas bahías (Alfacs y Fangar) demuestran, al menos, una causalidad más de carácter regional que local. No obstante, no han sido registradas en los análisis de las componentes armónicas de los mareógrafos localizados en el litoral del mar de Alborán.

Además, en los registros de l'Ampolla, bahía de Fangar, se observan dos picos adicionales:  $\sim 1.5$  h y  $\sim 0.7$  h, más energéticos que los demás, y que parecen estar relacionados temporalmente con las ondas de  $\sim 1.1$  h y  $\sim 0.5$  h.

En las ondas asociadas con los modos principales de oscilación de las dos bahías se observa una ligera variación estacional que invita a buscar causas de generación relacionadas con fenómenos atmosféricos.

Todas estas conclusiones plantean la necesidad de buscar mecanismos forzadores regionales más que locales, de origen atmosférico.

## **5. MODELACIÓN NUMÉRICA DE LA RESONANCIA EN ALFACS Y FANGAR**

### **5.1 Introducción**

Como se comentó en el capítulo anterior, se ha constatado, mediante observación directa y análisis estadístico de datos de nivel del mar en San Carles de la Ràpita y l’Ampolla, la existencia de ondas que coinciden con los períodos resonantes de las bahías de Alfacs y Fangar. La amplitud de estas oscilaciones es válida para el sitio de registro. Sin embargo, entre estos puntos y el interior de cada una de las bahías hay una distancia considerable. El objetivo de este capítulo es doble: Primero, corroborar, mediante modelación numérica, los períodos resonantes apreciados en los registros de nivel del mar de ambas bahías y segundo, observar el comportamiento espacial de las ondas resonantes para poder estimar los valores de la amplitud de las mismas en cualquier sitio de la bahía.

## **5.2 Importancia de la modelación numérica y selección del modelo a utilizar**

Tradicionalmente el análisis de la onda larga se ha hecho con base en cualquiera de los siguientes tres enfoques: análisis de datos del fenómeno, análisis de los mecanismos forzadores y modelación paramétrica del fenómeno, sacrificando de esta manera la posibilidad de hacer un análisis completo desde el punto de vista espacial y temporal. Apenas desde hace poco se han desarrollado estudios considerando, a lo sumo, dos de ellos de manera simultánea.

En algunos casos, incluso, se ha hecho uso de mediciones de laboratorio o de campo para corroborar las conclusiones obtenidas de registros tomados en campo. Sin embargo, la construcción de modelos físicos para el análisis de ondas largas requiere de la utilización de grandes tanques con dimensiones en los que la disipación de la onda larga pueda ser garantizada; así mismo, el proceso de generación de dichas ondas en laboratorio también parece ser difícil de resolver adecuadamente. Por otro lado, el trabajo de campo suele ser costoso si se quiere hacer una campaña lo suficientemente amplia temporal y espacialmente; sin embargo, la realidad muestra que casi siempre la toma de datos es corta y en unos pocos puntos, lo que genera el inconveniente de poder explicar solamente la situación en el momento y lugar de las mediciones.

Por lo tanto, debido a la dificultad de realizar campañas de campo o ensayos de laboratorio en todas y cada una de las zonas de interés técnico o ambiental en el ambiente costero, es necesario plantear alternativas que permitan obtener la mayor cantidad de resultados del fenómeno en el tiempo y en el espacio. En los últimos años se ha logrado, precisamente, un gran desarrollo en la modelación numérica. Con estas herramientas numéricas que se han desarrollado, ahora se pueden estimar la geometría de las ondas y las velocidades generadas por ellas antes, durante y después de la ocurrencia de cualquier variable del clima marítimo. Este análisis numérico es posible hacerlo en un dominio espacial amplio y con una resolución temporal que garantiza conclusiones acertadas. De esta manera, se pueden definir con anterioridad y más precisión los parámetros óptimos para el diseño de infraestructura

---

marítima, se pueden tomar decisiones con respecto a las afectaciones ambientales sobre la zona de influencia del fenómeno de estudio o se pueden establecer relaciones entre éste y la morfología de la zona donde se desarrolla.

En ese sentido, es importante aclarar que el clima marítimo está determinado por la presencia simultánea de ondas de corto período y de ondas de largo período. Todavía hasta ahora se modelan por separado los procesos asociados a ambos tipos de ondas. Es decir, existen modelos desarrollados para ondas cortas y modelos desarrollados para evaluar el comportamiento de las ondas largas. Pero la mayor cantidad de estos modelos no ha tenido en cuenta, o lo ha hecho de manera limitada, la importancia de los efectos no lineales. Además, en muchos de ellos tampoco se ha tenido en cuenta la relación de acoplamiento que puede existir entre ambos tipos de ondas.

Si bien todo esto es cierto, también es necesario establecer prioridades en la medida en la que se conozca el fenómeno. Por ejemplo, en Alfacs y Fangar el oleaje carece de interés, por cuanto ambas zonas se encuentran resguardadas morfológicamente de su incidencia. Por lo tanto, para el análisis del comportamiento hidrodinámico de las ondas largas en esos cuerpos de agua es apenas necesario utilizar modelos que resuelvan las ecuaciones de dicho tipo de ondas. Las oscilaciones observadas en las bahías de Alfacs y Fangar se caracterizan porque son ondas de pequeña amplitud y gran longitud. Estas características permiten su análisis por medio de la teoría lineal de ondas. Suele ser habitual considerar que los efectos no lineales son relevantes a partir de  $a/h > 0.3$ , lo que en nuestro caso implica oscilaciones del orden de 1.0 m, magnitudes que, como hemos visto en el anterior capítulo, no se superan en los registros de las dos serie de tiempo analizadas. Quiere esto decir que la mayor parte de los eventos que se producen allí pueden ser estudiadas por medio de la teoría lineal de ondas. Este hecho ha conducido a considerar como método de análisis más adecuado, para las *seiches* de Alfacs y Fangar, un modelo lineal de onda.

En los apartados siguientes se describe el modelo utilizado y los resultados obtenidos con la modelación numérica de las condiciones hidrodinámicas de las dos bahías.

## 5.3 Descripción del modelo numérico empleado

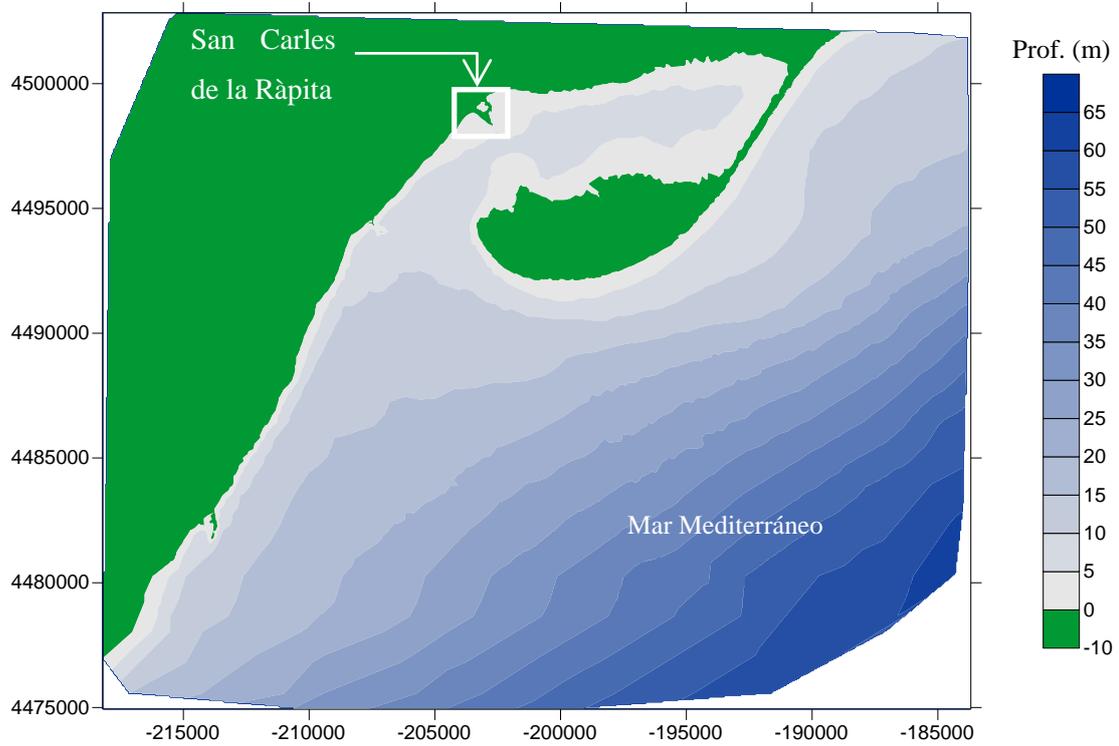
El modelo numérico utilizado para la simulación de la agitación resonante en las dos bahías es un modelo en elementos finitos denominado MSP, que ha sido desarrollado por Instituto de Hidráulica Ambiental, “IH Cantabria”, de la Universidad de Cantabria. Dicho modelo resuelve la ecuación conocida como “ecuación de pendiente suave”, es decir, contempla los efectos de refracción, difracción, asomeramiento, rotura, disipación por fondo y reflexión parcial o total de los contornos. El modelo puede simular oleaje monocromático o espectral. El potencial que ofrece el MSP radica en la capacidad de analizar el efecto de la reflexión múltiple de un tren de olas en el interior de una zona semicerrada, incluyendo todos los patrones de difracción producidos por los distintos contornos de la misma.

En el Anexo 2 se presentan las principales características del modelo utilizado para observar el comportamiento espacial de las oscilaciones resonantes en las bahías de análisis.

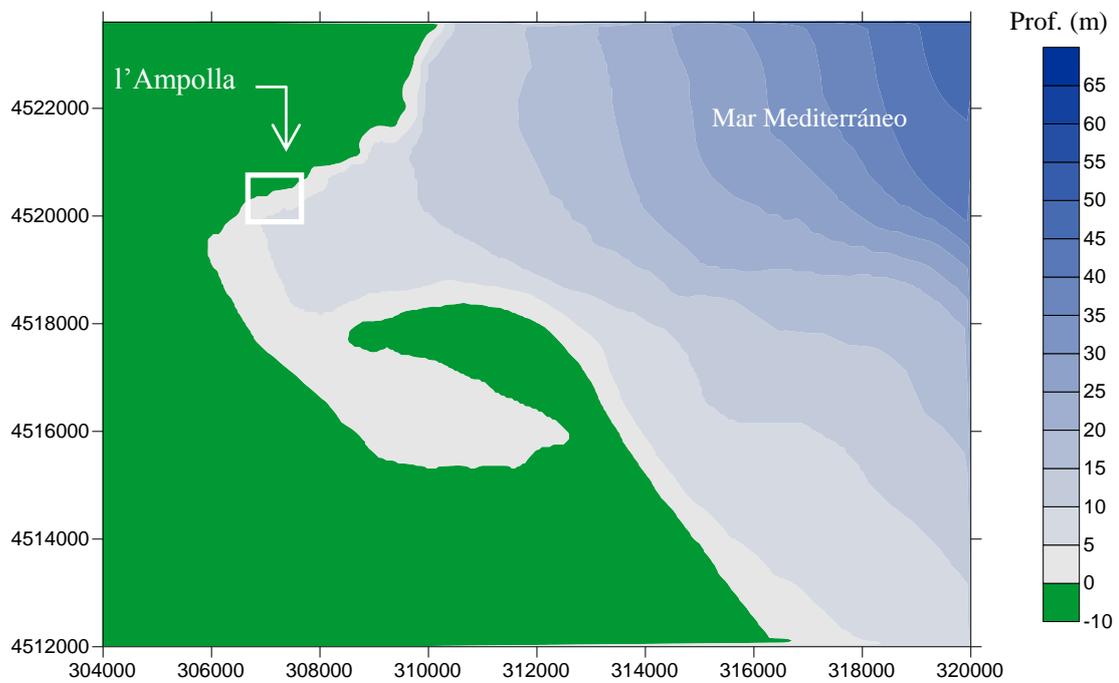
### 5.3.1 *Batimetrías*

Las batimetrías utilizadas para la modelación numérica del fenómeno resonante en las bahías de Alfacs y Fangar son las que se presentan a continuación.

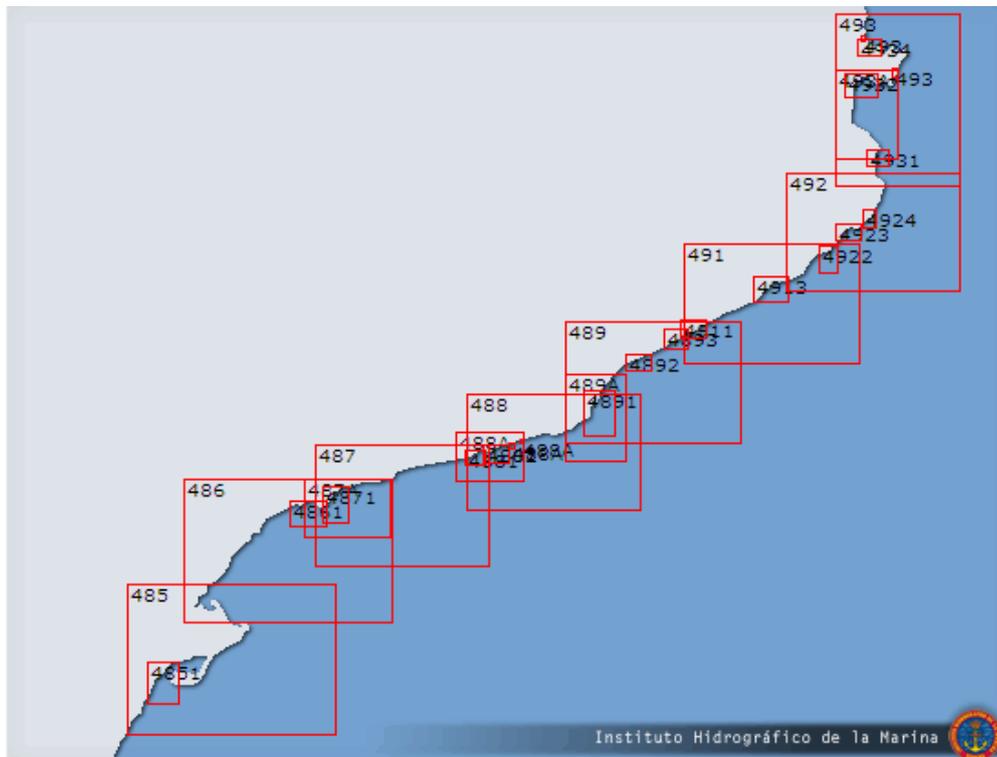
Estas batimetrías han sido obtenidas a partir de los datos de sondeos presentados en las cartas náuticas 485, 486 y 4851 del Instituto Hidrográfico de la Marina, tal como se muestra en la siguiente gráfica. La interpolación gráfica de las figuras anteriores ha sido definida mediante triangulación con interpolación lineal de 20 m x 20 m. Las características principales (escala y año de generación) se presentan también en la tabla 5.1.



**Figura 5.1 Batimetría de detalle de la bahía de Alfacs**



**Figura 5.2 Batimetría de detalle de la bahía de Fangar**



**Figura 5.3** Cartas náuticas de la costa mediterránea norte española del Instituto Hidrográfico de la Marina

**Tabla 5.1.** Características de las cartas náuticas de la zona de estudio

CARTA NÁUTICA	DESCRIPCIÓN	ESCALA	FECHA
486	Del puerto del Fangal al puerto de Torredembarra	1:60000	Julio de 2006
485	Del puerto de Vinaroz al puerto de La Ampolla	1:60000	Diciembre de 2004
4851	Puertos de Sant Carles de la Rápita y Alcanar	1:12500	Marzo de 2002

Como se observa en las figuras 5.1 y 5.2, las dos bahías, aunque similares en forma (casi rectangular), sus dimensiones son diferentes. La bahía de Alfacs tiene una longitud de unos 18 km, mientras que Fangar tiene unos 8 km de distancia desde la bocana hasta el extremo

interior. La profundidad media es de 3.5 m y 3.0 m respectivamente en Alfacs y Fangar; el fondo es muy constante, por lo que su forma puede aproximarse a una dársena de forma rectangular con fondo horizontal.

Ambas bahías pareciera que hubieran sido formadas por la acción conjunta del río y del oleaje, tal como se mostró en la Figura 1.8. Sin embargo, debe existir un fenómeno que no permite que las puntas de arena de ambas bahías se cierren completamente por la acción del oleaje. Esto es particularmente llamativo en los deltas con estas características, tal como se comentará en el Capítulo 11. A la luz de la amplitud de la bocana, exactamente la misma en una y otra bahía (2.8 km), pareciera que este fenómeno es similar en ambas bahías.

### **5.3.2 *Mallas de propagación***

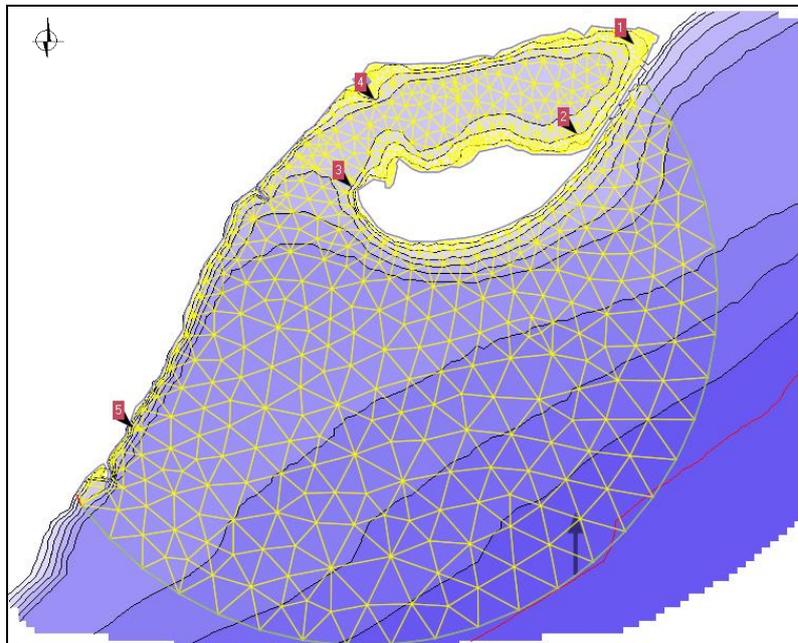
El dominio espacial de cálculo debe ser establecido en función de las características de la batimetría del sitio en el que se desea hacer la modelación numérica y de las condiciones hidrodinámicas en el contorno de entrada. Es decir, la malla de cálculo o de propagación debe ser capaz de representar correctamente las condiciones del fondo y las características de las ondas en el contorno del lado del mar. Precisamente para tener en cuenta el primero de estos dos aspectos se ha considerado una malla en elementos finitos, cuya resolución espacial mejora en la medida en la que la profundidad disminuye. El segundo aspecto puede ser solventado mediante la utilización de una corona que permita la generación de ondas en una o varias direcciones de interés. En ese sentido, la naturaleza misma de las bahías, con una bocana claramente definida, permite establecer que las ondas largas que se propagan hacia su interior sólo pueden provenir de pocas direcciones, por lo que una corona semicircular perfectamente puede cubrir todo ese rango. La profundidad constante de esa zona de generación puede producir algunos problemas numéricos en su entorno cercano, por lo que es recomendable siempre alejar al máximo la corona del dominio objetivo. En este caso se ha hecho.

Las siguientes figuras muestran las mallas de propagación utilizadas para simular el comportamiento espacial de las ondas resonantes en Alfacs y Fangar. Es lógico que las mallas dependan de la longitud de onda de la oscilación que se desea representar, siendo

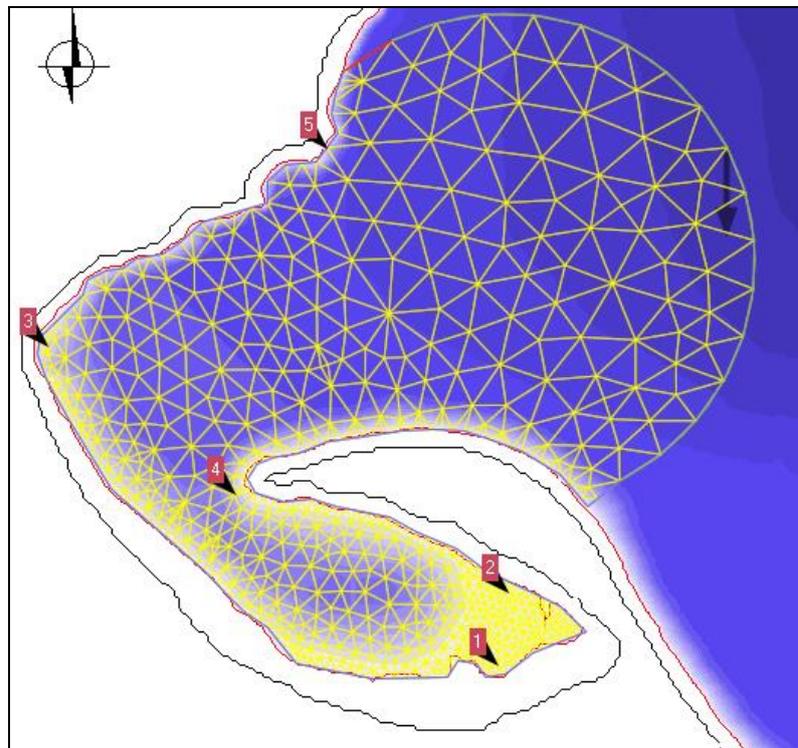
---

deseable disponer de al menos 10 elementos por longitud de onda, con el fin de caracterizar correctamente el perfil de la onda (Una onda se forma con, al menos, 9 puntos). Por otra parte, nótese que las mallas tienen, en su parte correspondiente al mar exterior, una forma de semicírculo, la corona de la malla de la que se habló en el párrafo anterior. En ella se define la dirección, amplitud y periodo del oleaje incidente.

La localización de cada elemento de la malla depende de la profundidad a la que se encuentra. Por lo tanto, si se quieren simular las tres condiciones de marea (bajamar, media marea, pleamar), hay que generar una malla por cada uno de esos niveles. En la siguiente figura se muestra, a manera de ejemplo, la malla para la condición de media marea. Con un período mínimo representativo de 1000 s y con 15 nodos por longitud de onda mínima, el número de nodos y elementos es de 1014 y 1684 y de 698 y 1195, en Alfacs y Fangar, respectivamente. La pequeña diferencia en el nivel del mar en la zona no hace que las mallas para las condiciones de bajamar y pleamar sean muy diferentes de ésta. En cambio, esta diferencia sí es importante para la amplitud y el período resonante de la bahía, tal como se verá más adelante.



**Figura 5.4** Malla de propagación y puntos de análisis en la bahía de Alfacs



**Figura 5.5** Malla de propagación y puntos de análisis en la bahía de Fangar

## 5.4 Resultados

A continuación se presentan los resultados de la simulación numérica, mediante modelación lineal, de las oscilaciones resonantes en las bahías de Alfacs y Fangar. En primera instancia se presenta una identificación de los períodos resonantes y, en segunda instancia, se muestra el comportamiento espacial de cada uno de esos modos.

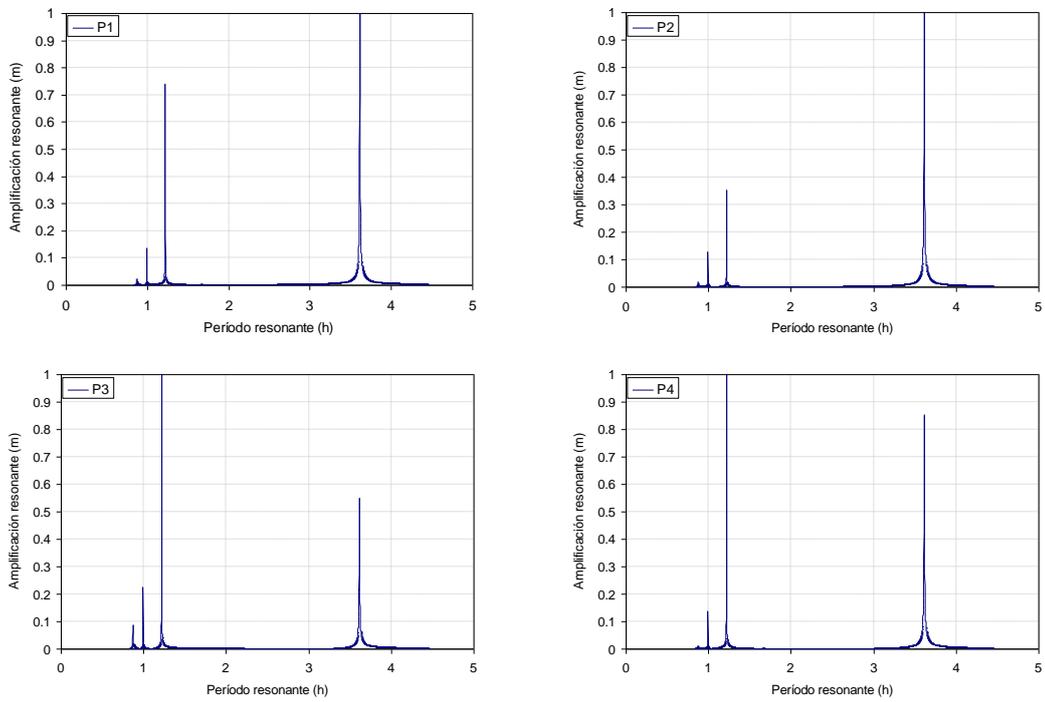
### **5.4.1 Modos resonantes**

Con el fin de observar el período resonante de las dos bahías, Alfacs y Fangar, se ha hecho un “barrido de frecuencias”. El modelo numérico se alimenta con ondas unitarias con períodos de onda que varían 10 s entre sí. El período mínimo de análisis ha sido de 3000 s en Alfacs y 1200 s en Fangar, mientras que el período máximo ha sido de 16000 s, para un total de 1301 y 1480 ondas unitarias, respectivamente. De esta manera, se puede obtener la respuesta resonante de la bahía, ante todas estas ondas, en varios puntos de análisis; estos puntos (Ver figuras 5.4 y 5.5) deben coincidir con los sitios donde, en teoría, debería ser máxima dicha respuesta.

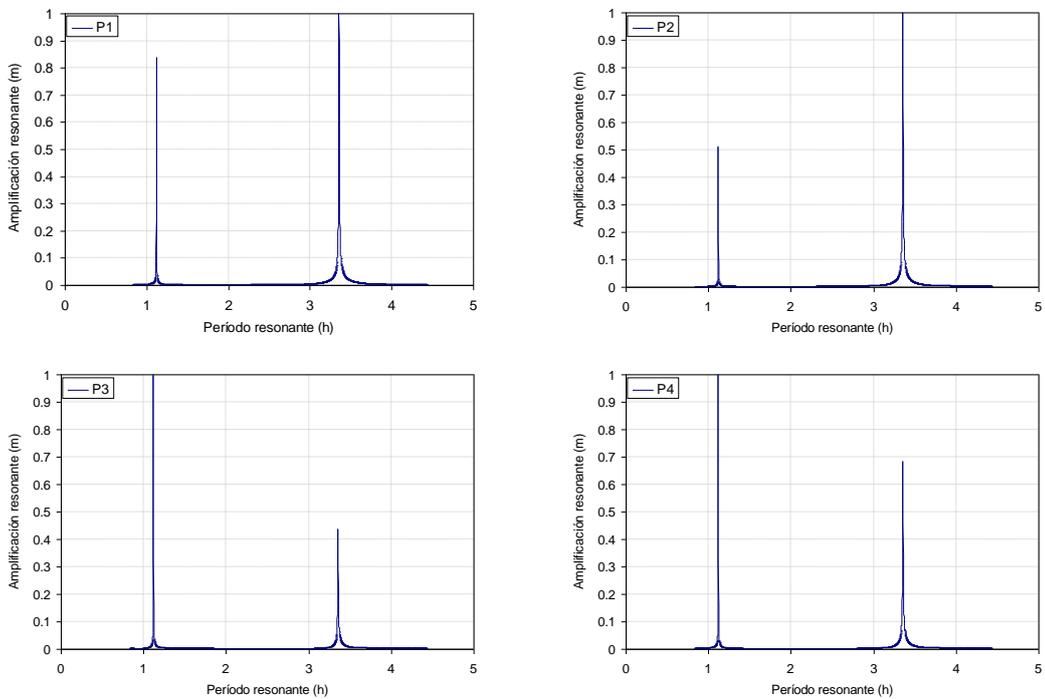
En ausencia de fricción y contornos totalmente reflejantes, cuando el período de la excitación coincide con el período resonante de una dársena, la oscilación se hace infinita. En la realidad esto no ocurre puesto que al aumentar la oscilación, los efectos de fricción y absorción parcial de los contornos limitan el crecimiento de la oscilación resonante. Si deseáramos que nuestro modelo de simulación numérica representara adecuadamente el fenómeno, este modelo debería incluir valores adecuados de la fricción y reflexión de los contornos que evitaran la amplificación excesiva de la agitación resonante. No obstante, nuestro interés es observar claramente los modos resonantes, por lo que la ausencia de fricción y los contornos totalmente reflejantes hacen fácil esta identificación.

El análisis sin fricción y con contornos totalmente reflejantes se ha hecho para los niveles de bajamar, media marea y pleamar. Las figuras siguientes muestran los resultados obtenidos del coeficiente de amplificación

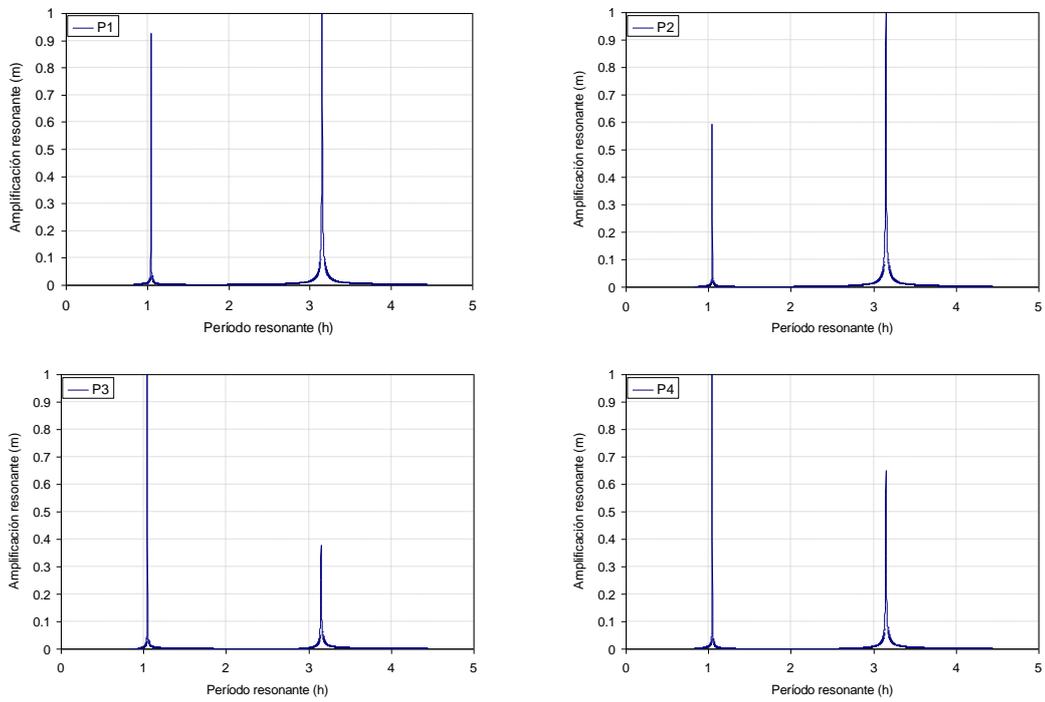
Los valores se han adimensionalizado con el máximo valor de  $K_a$  obtenido en cada punto, por lo que los resultados no son comparables punto a punto. Únicamente sirven como referencia para ver el comportamiento de la amplificación resonante en un sitio determinado.



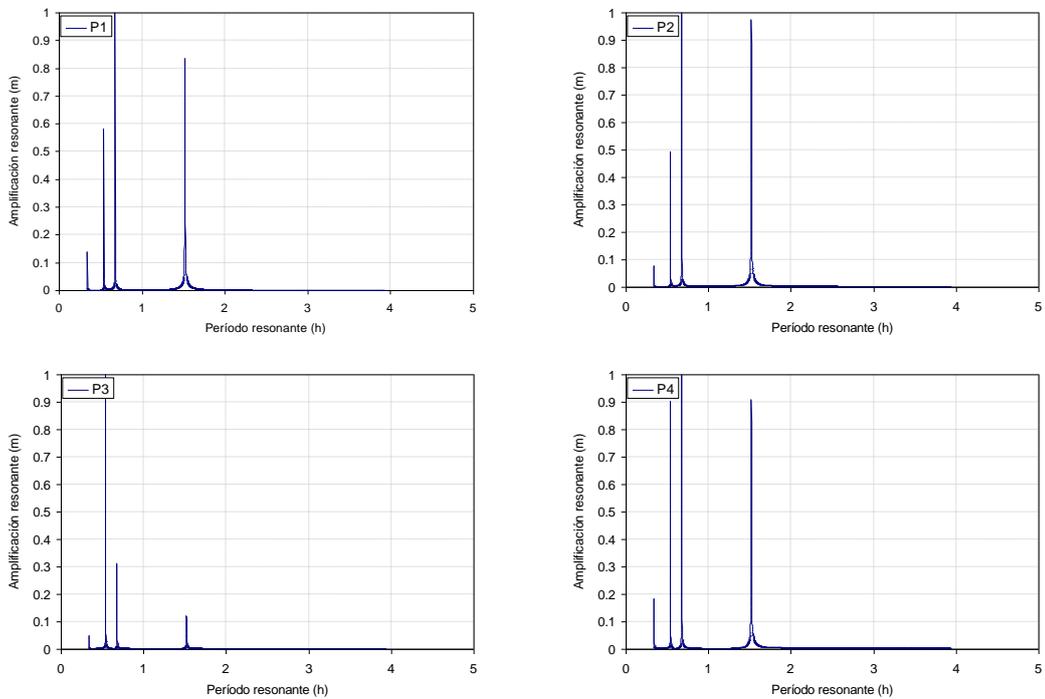
**Figura 5.6 Coeficiente de amplificación adimensionalizado Alfacs. Bajamar**



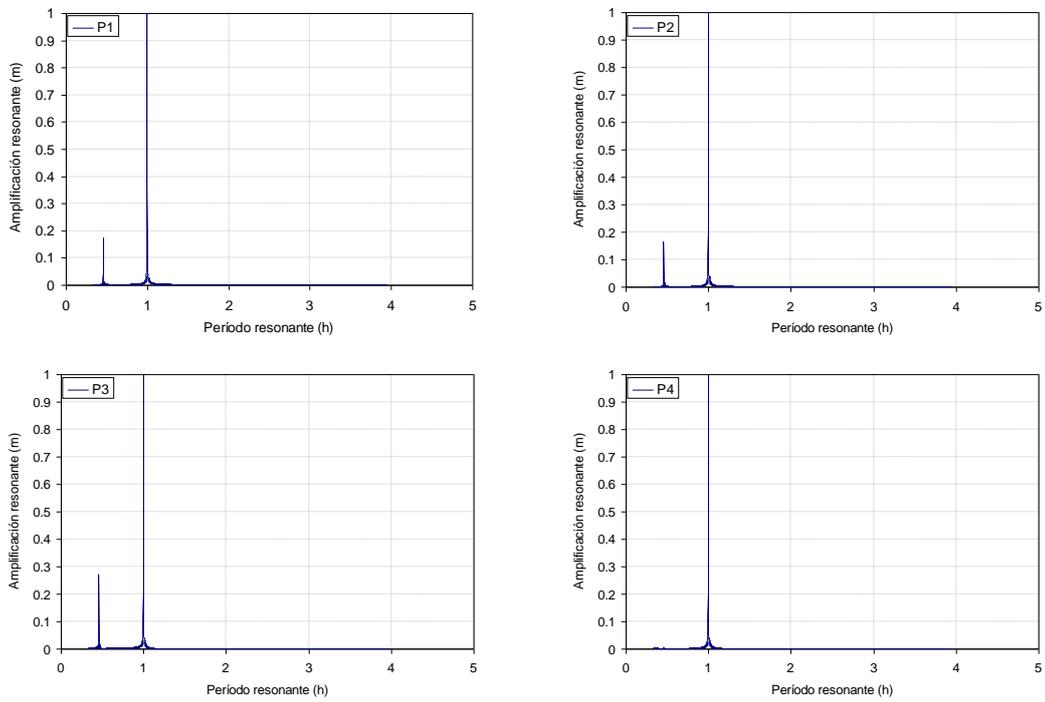
**Figura 5.7 Coef. de amplificación adimensionalizado Alfacs. Media marea**



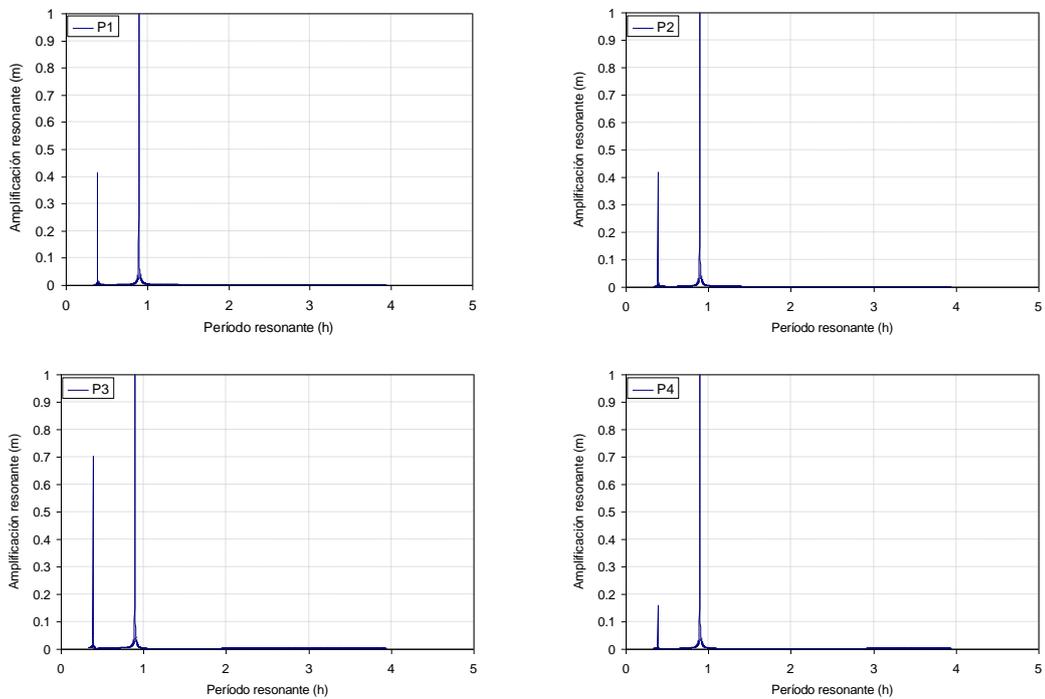
**Figura 5.8 Coef. de amplificación adimensionalizado Alfacs. Pleamar**



**Figura 5.9 Coef. de amplificación adimensionalizado Fangar. Bajamar**



**Figura 5.10** Coef. de amplificación adimensionalizado Fangar. Media marea



**Figura 5.11** Coef. de amplificación adimensionalizado Fangar. Pleamar

De estas figuras se pueden obtener los resultados que se resumen en las tablas que se presentan a continuación:

**Tabla 5.2. Período resonante bahía de Alfacs en bajamar, media marea y pleamar**

Modo resonante	Período resonante (h)		
	BM	MM	PM
Modo 1	3.6	3.3	3.1
Modo 2	1.2	1.1	1.1

**Tabla 5.3. Período resonante bahía de Fangar en bajamar, media marea y pleamar**

Modo resonante	Período resonante (h)		
	BM	MM	PM
Modo 1	1.5	1.1	0.9
Modo 2	0.7	0.5	0.4

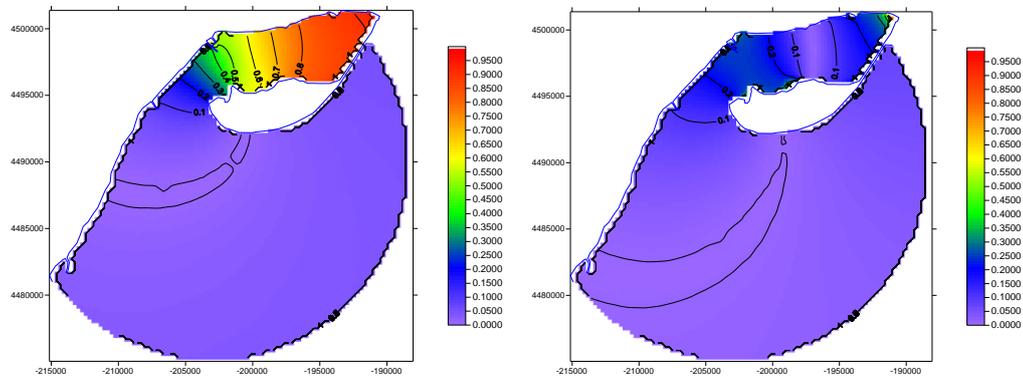
Al margen de los resultados en magnitud de la amplitud de la oscilación, se pueden obtener de estas gráficas algunas conclusiones.

En primera instancia, los dos modos resonantes principales coinciden con los encontrados en los registros de nivel del mar en ambas bahías, Alfacs y Fangar. En Alfacs, el modo resonante principal ( $T \sim 3.3$  h) se observa en los espectros de energía, mientras que ese mismo período, aunque también observado en los registros de Fangar, no parece ser la frecuencia resonante de mayor energía en esa última. Sí tienen mucha energía los demás períodos observados según el nivel del mar al que se propague la onda:  $T \sim 1.5$  h para bajamar y  $T \sim 1.1$  h en media marea y pleamar. Estos resultados demuestran dos comportamientos diferentes en una y otra bahía: un comportamiento regional que se observa tanto en Alfacs como en Fangar asociado a ondas de  $T \sim 3.3$  h,  $T \sim 1.1$  h y  $T \sim 0.5$  h, y un comportamiento más local observado en esta última asociado a los demás picos ( $T \sim 1.5$  h y  $T \sim 0.7$  h).

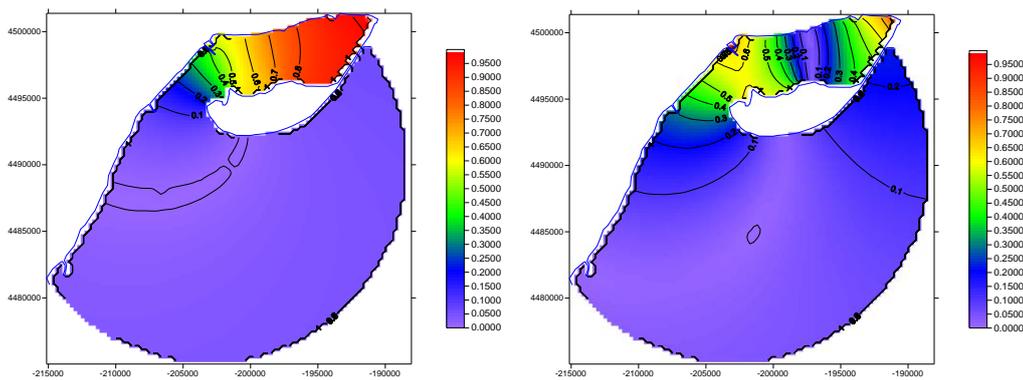
En segunda instancia, no obstante el régimen micromareal del mar Mediterráneo, el nivel del mar sí afecta considerablemente el período resonante.

### 5.4.2 Comportamiento espacial de los modos resonantes

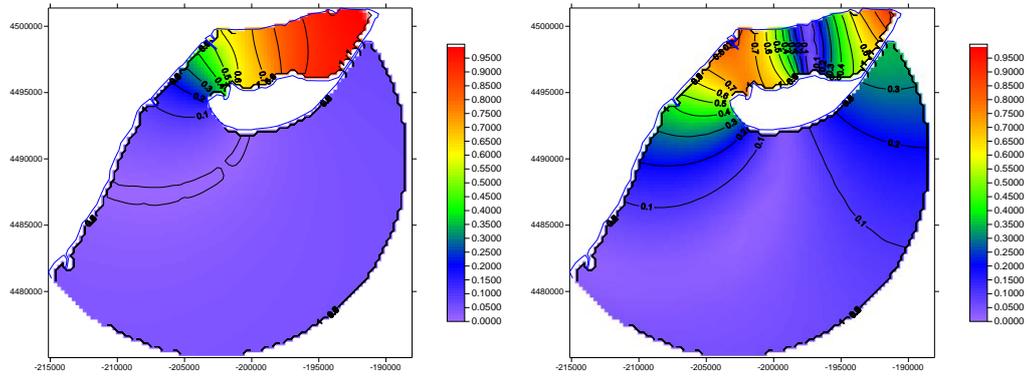
Ya se ha visto que el modelo numérico utilizado reproduce correctamente los períodos resonantes, en comparación con los obtenidos a partir del análisis de los registros de nivel del mar en San Carlos de la Ràpita y l’Ampolla. Teniendo en cuenta esta conclusión y alimentando el dominio espacial con una onda de amplitud unitaria es posible estimar el valor de la amplitud de la onda resonante en cualquier punto de las dos bahías analizadas, Alfacs y Fangar. A continuación se presentan las figuras de isoalturas de los dos modos resonantes para los diferentes niveles del mar analizados: bajamar, media marea y pleamar.



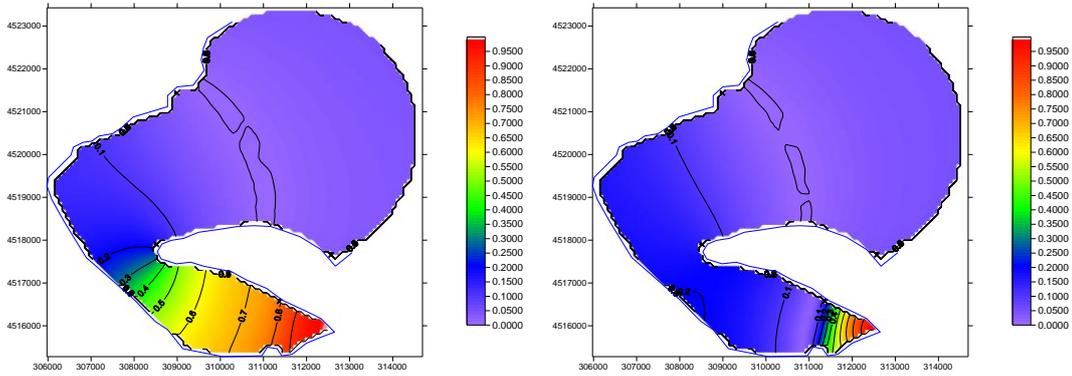
**Figura 5.12** Isoalturas de onda adimensionalizada con la máxima altura de onda en Alfacs. Bajamar. (a)  $T = 3.6$  h y (b)  $T = 1.2$  h.



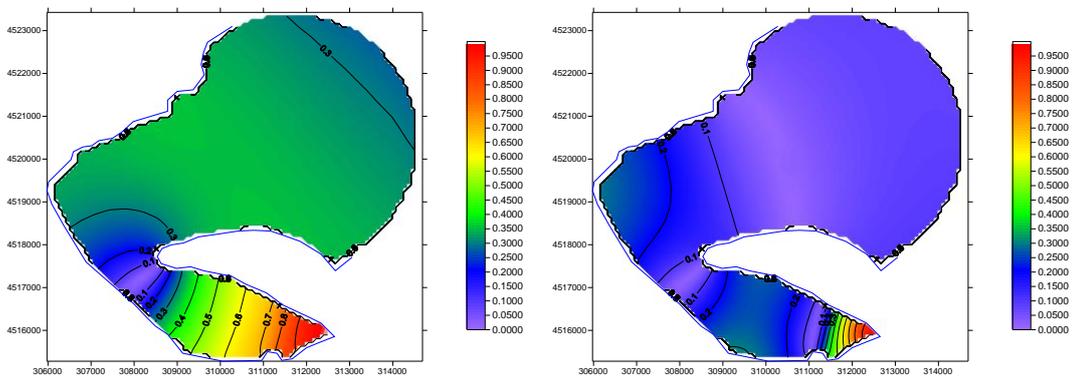
**Figura 5.13** Isoalturas de onda adimensionalizada con la máxima altura de onda en Alfacs. Media marea. (a)  $T = 3.3$  h y (b)  $T = 1.1$  h.



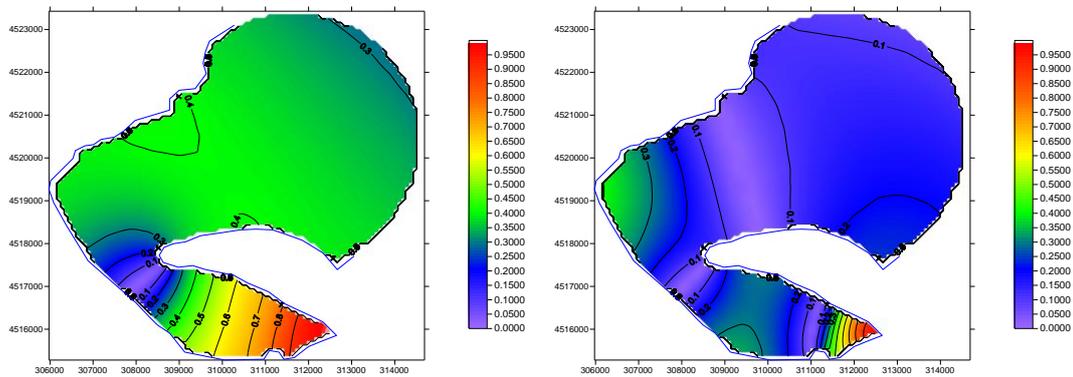
**Figura 5.14** Isoalturas de onda adimensionalizada con la máxima altura de onda en Alfacs. Pleamar. (a)  $T = 3.1$  h y (b)  $T = 1.1$  h.



**Figura 5.15** Isoalturas de onda adimensionalizada con la máxima altura de onda en l'Ampolla. Bajamar. (a)  $T = 1.5$  h y (b)  $T = 0.7$  h.



**Figura 5.16** Isoalturas de onda adimensionalizada con la máxima altura de onda en l'Ampolla. Media marea. (a)  $T = 1.0$  h y (b)  $T = 0.5$  h.



**Figura 5.17** Isoalturas de onda adimensionalizada con la máxima altura de onda en l’Ampolla. Pleamar. (a)  $T = 0.9$  h y (b)  $T = 0.4$  h.

Como era de esperarse, el primer modo de oscilación en ambas bahías presenta un nodo en la bocana, independientemente del nivel del mar. La zona de localización de dicho nodo en Alfacs varía ligeramente según el período de la onda incidente: cuanto menor es el período, más alejado de la bocana se encuentra el nodo. En todos los casos, el nodo de la onda se localiza a una distancia igual a 0.5-1.0 veces la longitud de la bahía. En algunos otros casos este valor llega a ser, incluso, de 2.0 veces la misma dimensión. En Fangar, gracias a la forma en “L” de la bahía, que genera dos tramos claramente diferenciados en forma y dirección, la onda muestra el efecto de dos bocanas; este efecto se observa mucho más claramente en la modelación numérica del segundo modo de oscilación.

Del comportamiento espacial de las ondas se puede decir que, debido a la forma rectangular de las bahías y al fondo aproximadamente plano, la oscilación longitudinal es predominante en todos los casos. Los vectores de velocidad estarán, también, predominantemente alineados con el eje de la bahía.

Además de la dinámica espacial de las ondas, lo que más importa con estos resultados es estimar el valor máximo de la amplitud de las ondas resonantes en el dominio espacial. Considerando que los instrumentos de medición del nivel del mar están localizados en un sitio determinado y registran ciertos valores de amplitud, usando los coeficientes de amplificación entre estos puntos y cualquier sitio del dominio espacial es posible estimar el valor de la amplitud de la onda en cada sitio de la bahía. Son de especial interés las máximas amplitudes, por cuanto los sitios escogidos para la presentación de los resultados son

aquellos en los cuales los coeficientes de amplificación son máximos. A continuación se presentan esos resultados en ambas bahías, Alfacs y Fangar.

**Tabla 5.4. Estimación de la amplitud máxima de las ondas resonantes en las bahías de Alfacs y l'Ampolla para las condiciones de media marea**

	Alfacs		L'Ampolla	
	Modo 1	Modo 2	Modo 1	Modo 2
Período resonante (h)	3.3	1.1	1.1	0.5
Altura PROMEDIO mensual en el mareógrafo (m)	0.09	0.06	0.05	0.04
Altura MÁXIMA mensual en el mareógrafo (m)	0.23	0.10	0.11	0.08
Altura MÍNIMA mensual en el mareógrafo (m)	0.03	0.02	0.02	0.02
$A_{\text{máx}}/A_{\text{mar}}^{(*)}$	1.81	1.06	3.29	3.60
Altura PROMEDIO mensual máxima en la bahía (m)	0.16	0.06	0.15	0.16
Altura MÁXIMA mensual máxima en la bahía (m)	0.41	0.11	0.38	0.30
Altura MÍNIMA mensual máxima en la bahía (m)	0.05	0.02	0.07	0.06

(\*) Relación entre la máxima altura y la altura en el sitio del mareógrafo

## 5.5 Conclusiones

A la luz de los resultados presentados anteriormente, es posible obtener las conclusiones que se exponen a continuación.

En efecto, según la modelación numérica lineal realizada en las bahías de Alfacs y Fangar, los picos extraordinarios observados en los espectros de energía de los datos de nivel del mar registrados en los mareógrafos de las dos bahías corresponden con diferentes períodos resonantes de las bahías según el nivel de referencia (bajamar, media marea o pleamar).

Como se dijo en el capítulo anterior, las ondas de  $T \sim 3.3$  h,  $T \sim 1.1$  h y  $T \sim 0.5$  h se observan en ambos registros, Alfacs y Fangar. Sin embargo, las ondas de  $T \sim 1.5$  h y  $T \sim 0.7$  h solamente se aprecian en los registros de esta última. Estos resultados están plenamente corroborados mediante modelación numérica y tienen su explicación en los diferentes niveles de referencia (bajamar, media marea o pleamar) a los que se puede propagar las ondas incidentes.

Las alturas máximas mensuales de las ondas resonantes pudieron llegar a ser, en 1999, de poco más de 0.40 m en ambas bahías, Alfacs y Fangar, ondas del mismo orden que la marea astronómica en la zona.

## **6. ANÁLISIS DE LOS POSIBLES MECANISMOS FORZADORES: VIENTO**

### **6.1 Introducción**

Como se explicó en el Capítulo 2, hay varios mecanismos identificados en la literatura para la generación de *seiches*. Es común encontrar fenómenos de resonancia producidos por cualquiera de los siguientes forzadores: 1) Viento, 2) Presión atmosférica, 3) Ondas de borde y 4) Tsunamis. Cualquiera de ellos puede ser el mecanismo generador de los *seiches* observados en Alfacs y Fangar.

Con el fin de observar si los diferentes fenómenos se convierten en mecanismos forzadores de las *seiches* de las bahías de Alfacs y Fangar, identificados en las series de tiempo de nivel

del mar (Capítulo 4), en este y en los capítulos siguientes se hará un análisis detallado de esos diferentes tipos de forzadores.

Los tsunamis son eventos esporádicos, no periódicos, con mucha energía generada en un momento determinado. Si bien, en teoría, los períodos de las ondas generadas por un tsunami en el mar Mediterráneo coinciden aproximadamente con los períodos de las ondas resonantes, observadas y verificadas numéricamente, de Alfacs y Fangar, la periodicidad del fenómeno resonante descrita en el Capítulo 4 hace concluir que las ondas estudiadas y las consecuencias que ellas generan no sean precisamente de esa génesis sísmica. Por lo tanto, el análisis que se hace en los siguientes capítulos se centra en los demás mecanismos forzadores: 1) Viento, 2) Presión atmosférica, 3) Ondas de borde. En este capítulo se aborda el primero de ellos.

El primer efecto directo producido en el océano por el esfuerzo del viento es la transferencia de energía hacia la superficie del agua. Como consecuencia de esto, se generan varios fenómenos. Por un lado, se producen consecuencias en la circulación, mediante lo que se conoce como espiral de Ekman; en zonas semicerradas pequeñas este efecto es casi imperceptible. Por otro lado, se generan las oscilaciones de corto período (oleaje) que tienen poca influencia en los *seiches*. Por último, en zonas semicerradas o bahías donde se observan rachas de viento en una misma dirección, el volumen de agua de dicha zona puede acumularse en el extremo interior mientras actúa el viento; si las rachas de viento son periódicas, se pueden generar ondas dentro de la bahía estrechamente relacionadas con las ondas de viento.

Si la frecuencia de las rachas de viento coincide con ciertas características geométricas de la bahía, se pueden generar ondas resonantes dentro de la misma. Precisamente en el presente capítulo se evalúa la posibilidad de que el viento, de la manera explicada, sea un mecanismo forzador de los *seiches* en Alfacs y Fangar. Para establecer un punto de referencia, se hace primero una descripción de las características de los campos de viento en la zona del Mediterráneo occidental, haciendo énfasis en el mar Balear. Posteriormente se evalúan temporal y estadísticamente la posibilidad del viento como causa generadora de los eventos resonantes en las bahías de interés.

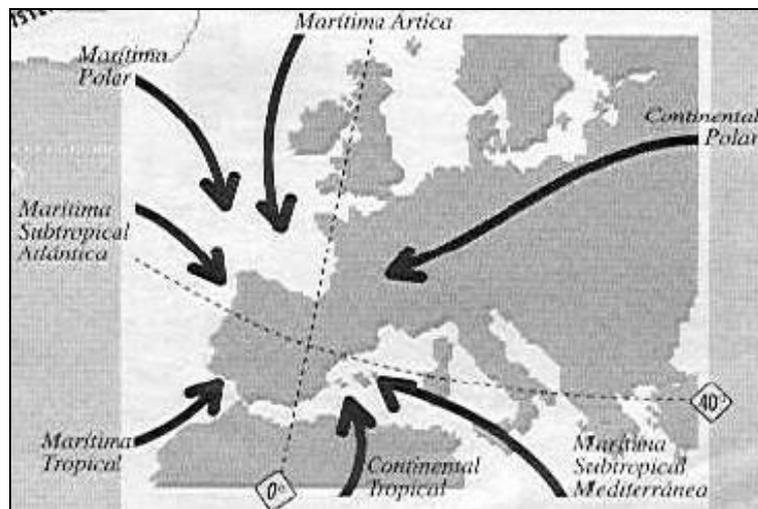
## 6.2 El viento en el mar Mediterráneo

Como ya se mencionó, uno de los posibles mecanismos forzadores de las *seiches* observadas en Alfacs y Fangar es el viento. Esta variable tiene un comportamiento muy particular en la zona estudiada, Delta del Ebro, que debe ser analizado considerando los procesos y fenómenos de escala sinóptica (diámetro mayor que 1000 km), los procesos y fenómenos de mesoescala (10 a 1000 km de diámetro), y los procesos y fenómenos de microescala. En todas estas escalas se pueden describir comportamientos que definen las características del viento y su posible relación con las ondas resonantes observadas. A continuación se presentan algunas consideraciones descriptivas de dicha variable en la zona analizada, con el ánimo de que sirva como punto de referencia o como base explicativa del análisis local realizado en las bahías de Alfacs y Fangar.

### 6.2.1 *Meteorología sinóptica y de mesoescala relacionada con el clima de la Península Ibérica*

Los grandes centros de acción atmosférica que afectan la zona mediterránea provienen del Atlántico. Al Suroeste de la Península, el anticiclón de las Azores, de carácter subtropical, aporta masas de aire estable y cálido hacia la región, provocando largos períodos de sequía y aridez, más fuerte cuanto más hacia el Sureste nos encontremos en la Península. Por el Norte, también en el Atlántico, se originan depresiones que suelen penetrar por el mar Cantábrico y proporcionan un aire más frío y lluvioso. En algunas ocasiones, estas depresiones se desplazan hacia el estrecho de Gibraltar e inducen lluvias intensas en el levante peninsular. Otro centro de acción importante está representado por las ciclogénesis que se originan en el mar Mediterráneo occidental, con una elevada influencia en la definición de las características climáticas del Este peninsular (Jorba *et al*, 2004). La figura siguiente resume estas observaciones.

---



**Figura 6.1 Masas de aire que llegan a la Península Ibérica**

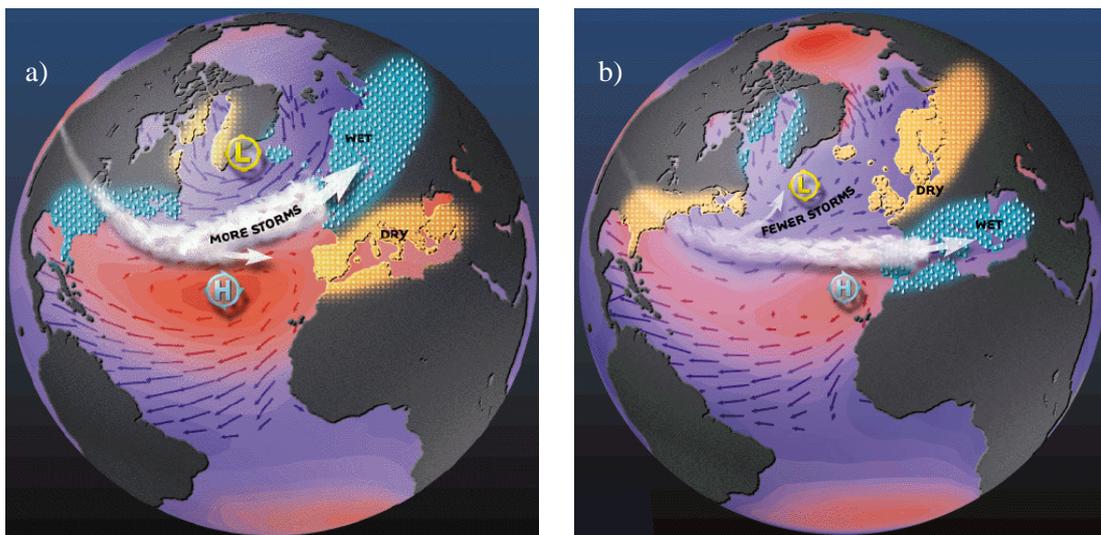
Modificado de INM

En términos generales, las masas de aire que llegan a la Península Ibérica, mostradas esquemáticamente en la figura anterior, reflejan una gran variedad de frentes posibles, cuya variabilidad depende de las condiciones estacionales, por supuesto, y de unos patrones de una variabilidad interanual, sobre todo en las condiciones de invierno.

Hasta los años 80's del siglo pasado era común oír hablar de un gran número de patrones de variabilidad climática que influían en los cambios de las condiciones climáticas de las distintas regiones del mundo. En los últimos años se ha visto que todos esos patrones pueden ser englobados en unos pocos que controlan el clima global. En el Hemisferio Norte se han identificado dos patrones principales, *Northern Annular Mode* (NAM) y *Pacific-North American Pattern* (PNA) (Kerr, 2005).

En el caso de la variabilidad del clima europeo y particularmente de la Península Ibérica, la NAM engloba la Oscilación del Atlántico Norte (North Atlantic Oscillation, NAO). Esta oscilación no es más que un dipolo Norte-Sur de anomalías de presión atmosférica con un centro localizado sobre Islandia y otro de signo opuesto extendiéndose por las latitudes centrales del Atlántico Norte entre los 35°N y los 40°N. Como las demás oscilaciones de este tipo, se presenta una fase positiva y una negativa. La primera de ellas presenta un centro de

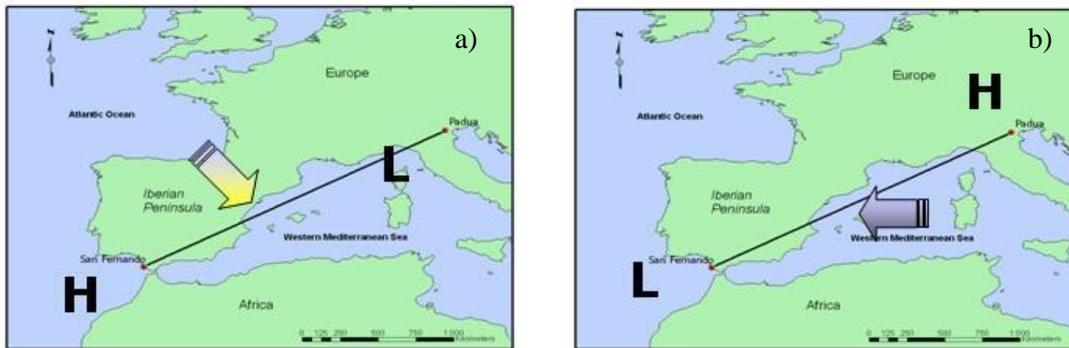
presiones subtropical más intenso de lo normal con inviernos más cálidos y húmedos en Europa septentrional, mientras que la región mediterránea presenta inviernos más fríos y secos. Durante la fase negativa, este patrón se invierte. La figura siguiente muestra un esquema de las dos fases.



**Figura 6.2** Esquema de las fases de la NAO. a) Fase positiva, b) Fase negativa

Tomado de IDEO, University of Columbia

En algunas zonas donde la influencia de la NAO es limitada, como el litoral del mar Balear, se ha propuesto otro índice: el WeMOi (Western Mediterranean Oscillation Index). Este índice indica una diferencia de presión atmosférica entre la ciudad de Pádua en la llanura del río Po, al norte de Italia, y San Fernando en el golfo de Cádiz en España. Igualmente tiene una fase positiva y una negativa, que indican en términos generales vientos provenientes del NO y del E, respectivamente. En el primer caso, los vientos no transportan humedad, mientras que en el segundo, la humedad capturada en el Mediterráneo se precipita sobre la zona Este de la Península (Figura 6.3).



**Figura 6.3** Esquema de las fases del WeMOi. a) Fase positiva, b) Fase negativa

Tomado de [www.ub.edu/gc](http://www.ub.edu/gc)

## 6.2.2 *Comportamiento del viento en la zona Mediterránea*

Las grandes estructuras marinas como el océano Atlántico (incluido el mar Cantábrico) y el mar Mediterráneo que encierran la Península, la influencia de las condiciones atmosféricas del norte de África y el variado relieve con cadenas montañosas (Pirineos, Cordillera Cantábrica, Sierra Nevada, Cordillera Ibérica o Sistema Central), amplias mesetas y estrechas franjas litorales, origina una particular distribución espacial y temporal de nubes, radiación solar, precipitación y vientos. La localización de la Península entre las zonas tropicales y las templadas hace que sea una zona en la que se mezclan las influencias de la corriente polar, con sus frentes y borrascas asociados, y las altas presiones tropicales del anticiclón de las Azores. Esto implica una gran variabilidad en las temperaturas y precipitaciones y, por supuesto, en los vientos.

En particular, la zona mediterránea tiene características climáticas muy particulares y, en ese sentido, el viento de esta región hay que analizarlo con cuidado. Sobre todo si se tiene en cuenta que todo el litoral del levante peninsular se caracteriza por una compleja orografía con cordilleras litorales en la mayor parte. Desde el sur, se alzan las cordilleras del Sistema Penibético, el Sistema Subbético, más hacia el norte el límite sureste del Sistema Ibérico y las cordilleras litorales y prelitorales de Cataluña. La figura siguiente muestra estos sistemas

montañosos, paralelos a la costa a una distancia promedio de 30-50 km y claramente visibles entre Alicante y Gerona.



**Figura 6.4 Relieve de la Península Ibérica**

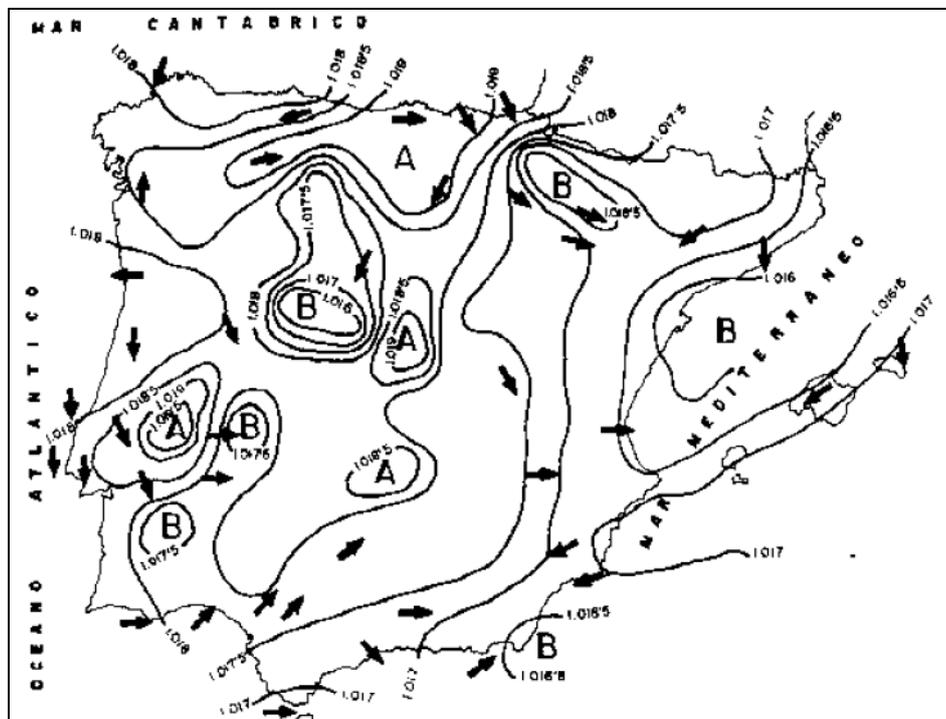
Tomado de [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/3c/Spain\\_topo.jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/3c/Spain_topo.jpg)

Si no fuera por estas características orográficas, los vientos de la Península Ibérica serían más uniformes. Ese relieve es la causa de unos vientos complejos y variables espacialmente.

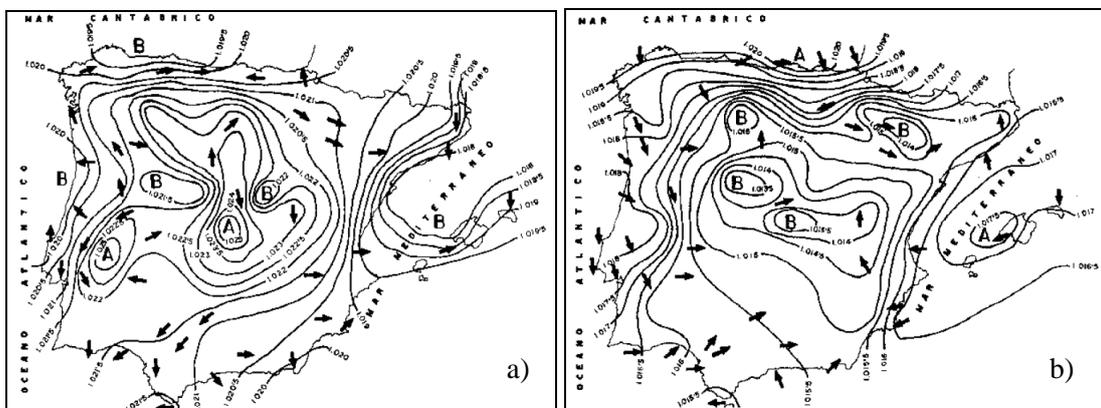
En su promedio anual, los vientos dominantes de la Península Ibérica varían en función de la zona climática (Figura 6.6). En la vertiente occidental atlántica dominan los de componente O. En la franja litoral de Portugal predominan los vientos que inciden del N y del NO. En la parte Norte del interior de la Península sigue dominando la componente N y, a medida que nos desplazamos hacia el Suroeste los vientos provenientes del SO cobran mayor

importancia. En el flanco Oriental de la meseta ibérica son los vientos que se dirigen hacia el SE los dominantes.

El litoral mediterráneo y, en particular el litoral localizado entre Valencia y Barcelona, se caracteriza por presencia de vientos de todas las direcciones. Una zona de baja presión bien definida en el centro del mar Balear genera atracción de flujos hacia ella. De esta manera, la zona norte de Cataluña presenta vientos provenientes del Norte, el golfo de Valencia vientos del Oeste y las Baleares del Noreste.



en los promedios multianuales del mes de enero), no parece haber mayores cambios con respecto a las condiciones medias multianuales. No obstante, la zona de altas presiones mejor definida en el centro de la Península genera mayor influencia de los vientos que inciden del Oeste y Suroeste. Por el contrario, durante el verano (representado en las condiciones de julio), esa zona de altas presiones del centro de la Península se debilita y los vientos observados en el mar Balear provienen principalmente del Este. Estas observaciones se muestran en la siguiente figura y están estrechamente relacionados con la WeMOi.



**Figura 6.6 Mapa de isobaras en superficie (hPa) y dirección del viento promedio multianual, en a) enero y b) julio**

Tomado de Capel-Molina, 2000

### 6.3 Posible relación entre el viento y las *seiches* de Alfacs y Fangar

En el apartado 6.2 se explicó, con cierto nivel de detalle, la forma como se comporta el clima, y en particular los vientos, en la Península Ibérica y el mar Balear. De estas observaciones se pudo concluir que, en términos medios, la dirección dominante (en el tiempo y en el espacio) del viento proviene del Oeste. Este comportamiento se acentúa en

invierno y se debilita, hasta el punto de revertirse, en verano. Esta variación en la dirección del viento coincide perfectamente con el alineamiento del litoral, con la plataforma continental y con el eje principal de las bahías de Alfacs y Fangar.

Los vientos perpendiculares a la línea de costa y, por ende, al eje principal de las bahías se consideran brisas de mar y tierra, producidas por la diferencia de temperatura entre ambos cuerpos. La capacidad calorífica del océano hace que la temperatura superficial del mar se mantenga casi invariable durante el ciclo diario, lo que no ocurre con los suelos. Es decir, la temperatura superficial del suelo es superior a la del mar en el día e inferior a la misma durante la noche, lo que genera vientos en una y otra dirección. Esos vientos se denominan brisas y se producen en primavera y otoño. Su energía es tan baja que no alcanzaría a generar ondas lo suficientemente fuertes para forzar la resonancia en las bahías de Alfacs y Fangar. Por lo tanto, no se considera que estos vientos generen los fenómenos de interés en esta tesis.

Por otra parte, la implicación de oscilaciones climáticas de más largo período en el fortalecimiento o debilitamiento de las condiciones de invierno fundamentalmente (esto es, en el fortalecimiento o debilitamiento de los vientos provenientes del Oeste), particularmente las condiciones descritas por el WeMOi, generan una posibilidad de que las velocidades alcanzadas en algunos casos tengan suficiente energía como para empujar un volumen considerable de agua hacia el extremo interior de ambas bahías. Si, además, las condiciones meteorológicas producen rachas periódicas de dichas magnitudes, es posible que esa frecuencia esté coincidiendo con las características geométricas de las bahías y, por ende, generando una amplificación resonante en ellas.

La hipótesis a evaluar es, entonces, la siguiente: *Los vientos provenientes del SO pueden incitar a la bahía de Alfacs, mientras que los vientos que provienen del NE pueden hacerlo mismo en Fangar.* Con el objetivo de verificar esta hipótesis, a continuación se presentan los resultados del análisis conjunto de series de nivel del mar, descritas y analizadas con detalle en el Capítulo 4, y de las series de velocidad y dirección del viento en las bahías de Alfacs y Fangar.

## **6.4 Velocidad del viento en Alfacs y Fangar**

### **6.4.1 Estaciones de registro**

Para analizar si el viento puede ser un mecanismo forzador de las ondas resonantes en las bahías de estudio, han sido analizados los registros de dirección y velocidad del viento en San Carlos de la Rápita (Alfacs) y l’Ampolla (Fangar). Los instrumentos, estaciones automáticas Aanderaa AWS 2700, hacen parte de la Red de Instrumentos Oceanográficos y Meteorológicos, XIOM por sus siglas en catalán, ya descrita en el Capítulo 4. En la figura siguiente se muestra la localización y características de las estaciones meteorológicas.

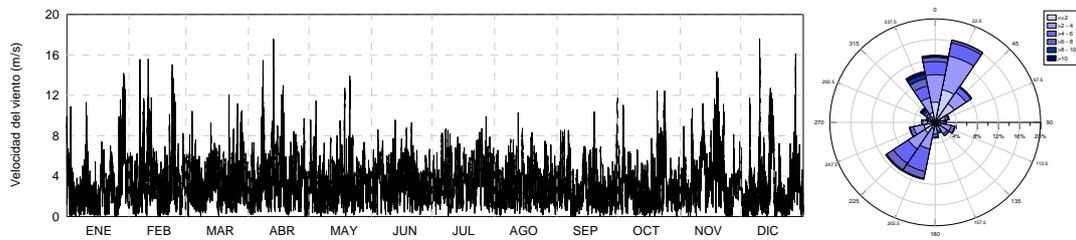
Las estaciones meteorológicas analizadas registran cada 10 minutos datos de velocidad y dirección del viento. El período de tiempo analizado incluye desde 1997 hasta 2002. Los datos analizados son los del año 1999, coincidentes con el período de análisis del nivel del mar.



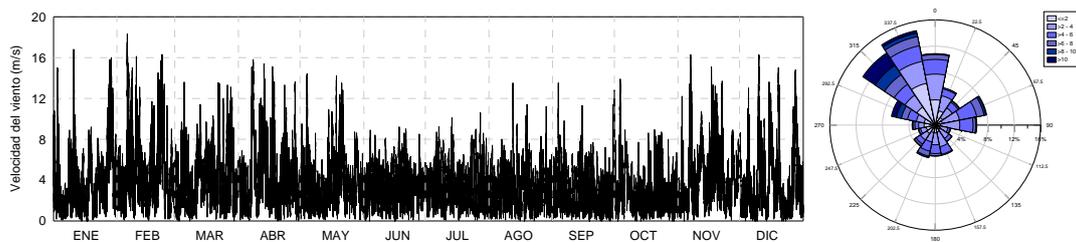
**Figura 6.7 Localización y características de las estaciones meteorológicas de San Carlos de la Ràpita y l’Ampolla**

### 6.4.2 Series de tiempo de velocidad del viento en Alfacs y Fangar

Las figuras siguientes presentan la variación temporal de los registros de velocidad del viento de 1999. En ambos casos, San Carles de la Ràpita (Alfacs) y l’Ampolla (Fangar), las velocidades del viento llegan a ser en algunos casos de invierno e, incluso en primavera y otoño, de entre 12 y 16 m/s. En esas épocas, parece haber una energía más fuerte con una periodicidad de 5 a 15 días. En verano, las velocidades máximas se observan en torno a los 8 a 10 m/s, tanto en una como en otra serie. Las series de tiempo registradas en ambas bahías son coincidentes, de tal forma que los máximos y los mínimos en una se presentan a la misma vez que en la otra.



**Figura 6.8 Variación temporal de la velocidad del viento y rosa de vientos en San Carles de la Ràpita, bahía de Alfacs**

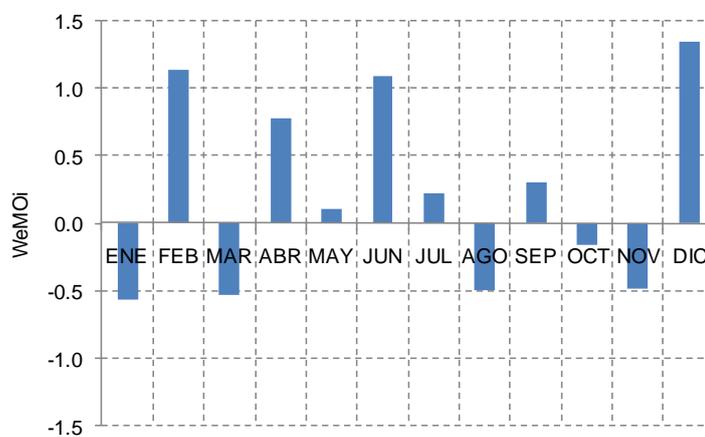


**Figura 6.9 Variación temporal de la velocidad del viento y rosa de vientos en l’Ampolla, bahía de Fangar**

Sin embargo, llama la atención de estas figuras la diferencia tan marcada que existe entre los registros de dirección del viento. Por un lado, las direcciones predominantes NO observadas en Fangar responden a una condición positiva de WeMOi (Ver Figura 6.3). Por otro, en

Alfacs se observan direcciones SO y NE, producto de un control orográfico impuesto por la serranía de 660 m de altitud que se observa al NO de la bahía a los vientos provenientes de esa dirección NO, lo que indica también una concordancia con la fase positiva del WeMOi.

Precisamente viendo los datos de WeMOi durante el año 1999 (Figura 6.10) se observa que, si bien en ese período de tiempo tuvo cierta variabilidad, la condición positiva del índice predominó, generando vientos del NO principalmente.



**Figura 6.10 Variabilidad mensual del WeMOi**

Esta posible relación de la velocidad del viento con un índice que explica oscilaciones de tipo meteorológico implica también cierta aleatoriedad de las series. Al igual que con el nivel del mar, los registros de viento se sometieron a pruebas de homogeneidad que permiten ver la calidad de los datos. Para evaluar cambios en la media o la varianza, se usaron pruebas no paramétricas que fueran independientes de su distribución probabilística, Wilcoxon y Levene, respectivamente. Los resultados de los análisis se presentan en la siguiente tabla.

**Tabla 6.1. Parámetros estadísticos y análisis de calidad de la serie de velocidad del viento en San Carles de la Ràpita y l’Ampolla**

<b>Parámetros</b>	<b>San Carles de la Ràpita</b>	<b>l’Ampolla</b>
Cantidad de datos	52560	52560
Media (m/s)	3.37	3.81
Máximo (m/s)	17.50	18.30
Mínimo (m/s)	0.00	0.00
Desviación (m/s)	2.16	2.68
Cambio en la media	Salto en la media desde agosto	Salto en la media desde agosto
Cambio en la varianza	No hay cambio en la varianza	No hay cambio en la varianza

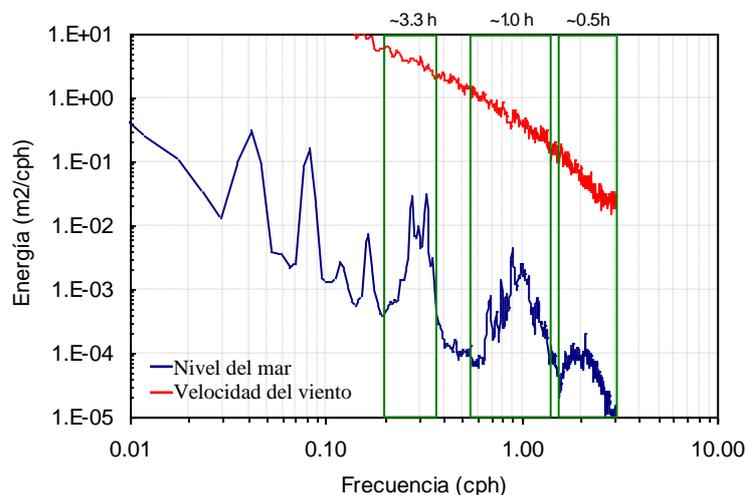
Como se desprende de la tabla anterior, y coincidiendo con los resultados de nivel del mar, se puede concluir que no hay cambios estadísticamente significativos en la media o la varianza de los datos. La diferente condición estacional en los períodos ENE-AGO y AGO-DIC son las que generan ese pequeño salto registrado en la media, pero que no es estadísticamente significativo. Por lo tanto, es posible continuar con un análisis más detallado de los registros.

## **6.5 Análisis espectral de la velocidad del viento en las bahías de Alfacs y Fangar**

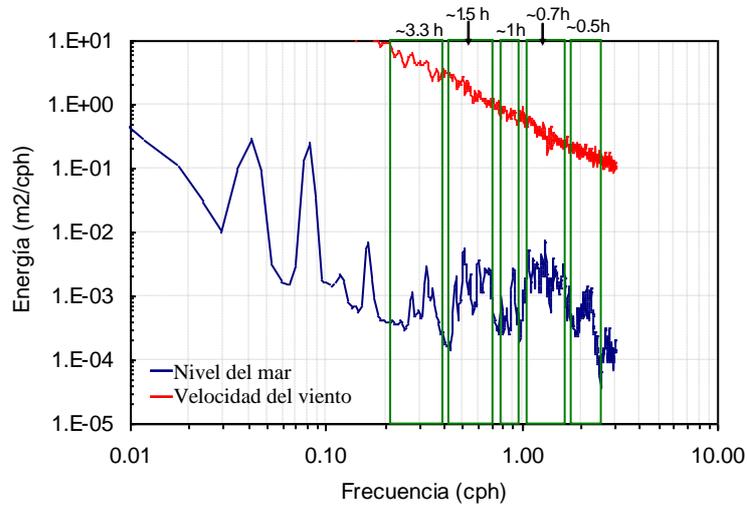
A continuación se hace el análisis espectral de Fourier de las series temporales de velocidad del viento en San Carles de la Ràpita (Alfacs) y l’Ampolla (Fangar). Estos resultados se han comparado con los mismos espectros de nivel del mar de ambos sitios presentados en el Capítulo 4, buscando alguna relación apreciable a simple vista, y a continuación se presentan

los espectros de coherencia entre ambas señales. Este tipo de gráficas muestran la relación que puede existir entre las diferentes frecuencias de una señal.

En los espectros de velocidad del viento de ambos sitios, San Carles de la Ràpita y l'Ampolla, se observa claramente que no existen, en la serie de velocidad del viento, alta energía alrededor de las frecuencias de nivel del mar que entran en resonancia con las bahías. Esto lleva a sospechar que la relación entre los registros de nivel del mar y de velocidad del viento es, cuando menos, mínima.

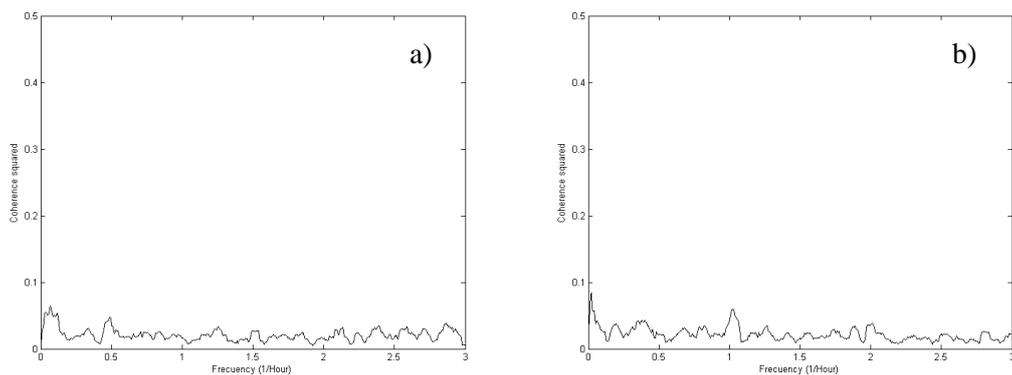


**Figura 6.11** Espectro de Fourier de las series de velocidad del viento y nivel del mar durante 1999 en San Carles de la Ràpita, bahía de Alfacs



**Figura 6.12 Espectro de Fourier de las series de velocidad del viento y nivel del mar durante 1999 en l'Ampolla, bahía de Fangar**

Estas mismas conclusiones se pueden obtener de los espectros de coherencia entre señales. La práctica inexistencia de alguna coherencia en el rango de frecuencias analizadas permite concluir que la velocidad del viento, por sí sola, no es la variable que genera las amplificaciones resonantes en Alfacs y Fangar, al menos en las frecuencias de 3.3 h, 1.1 h y 0.5 h.



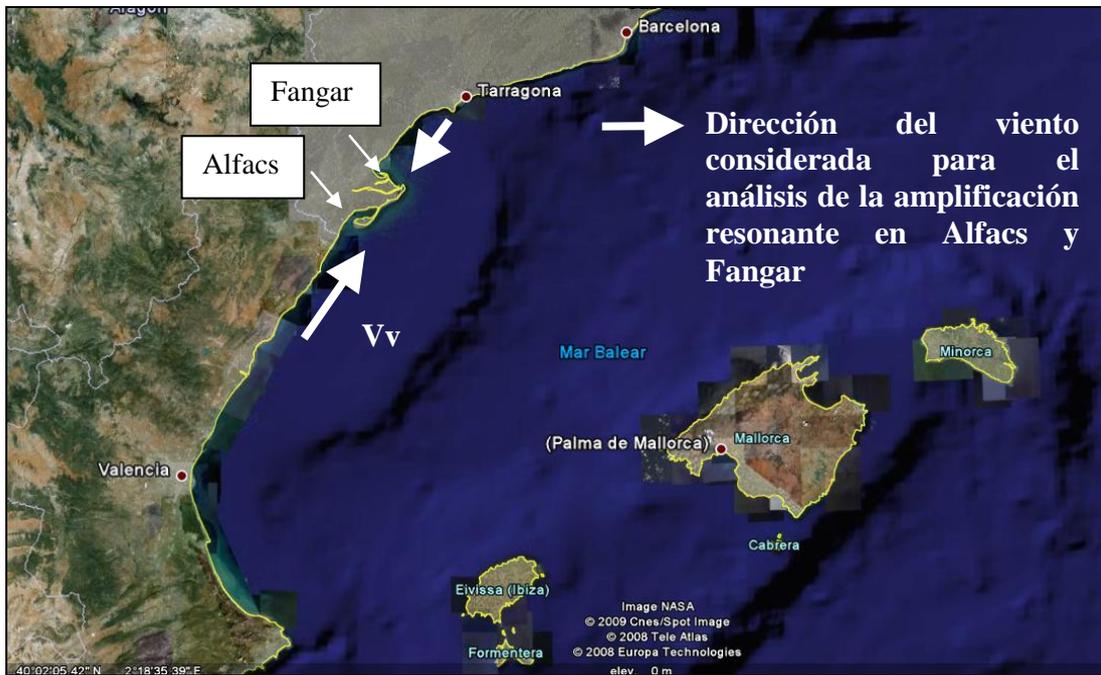
**Figura 6.13 Coherencia de señales de velocidad del viento y nivel del mar durante 1999 en a) Alfacs y b) Fangar**

## **6.6 Análisis conjunto de la velocidad y la dirección del viento en las bahías de Alfacs y Fangar**

No obstante las conclusiones obtenidas en el apartado anterior, es posible que la velocidad del viento de ciertas direcciones, y no de otras, sea la causa de la generación de la amplificación resonante en Alfacs y Fangar. Esta posible forma de relación entre la dirección y la generación de *seiches* se explicó con más detalle en el apartado 6.3.

Para el análisis de la influencia en la dirección del viento y la amplificación resonante en las dos bahías analizadas, se han considerado cuatro posibles direcciones de incidencia del viento sobre la bahía, en relación con los ejes principales de la misma. De esta manera, se pueden presentar cuatro posibles casos: 1) Si en un momento dado el viento proviene de una dirección que incide directamente sobre la bocana, de forma paralela al eje longitudinal de la bahía (1.1 del SO en Alfacs y 1.2 del NE en Fangar), este viento puede generar ondas que entren directamente a la misma con mucha energía. 2) Si el viento sopla desde tierra (2.1) o desde el mar (2.2), la perpendicularidad con respecto a la orientación general de la costa no genera ondas que puedan producir resonancia en las bahías.

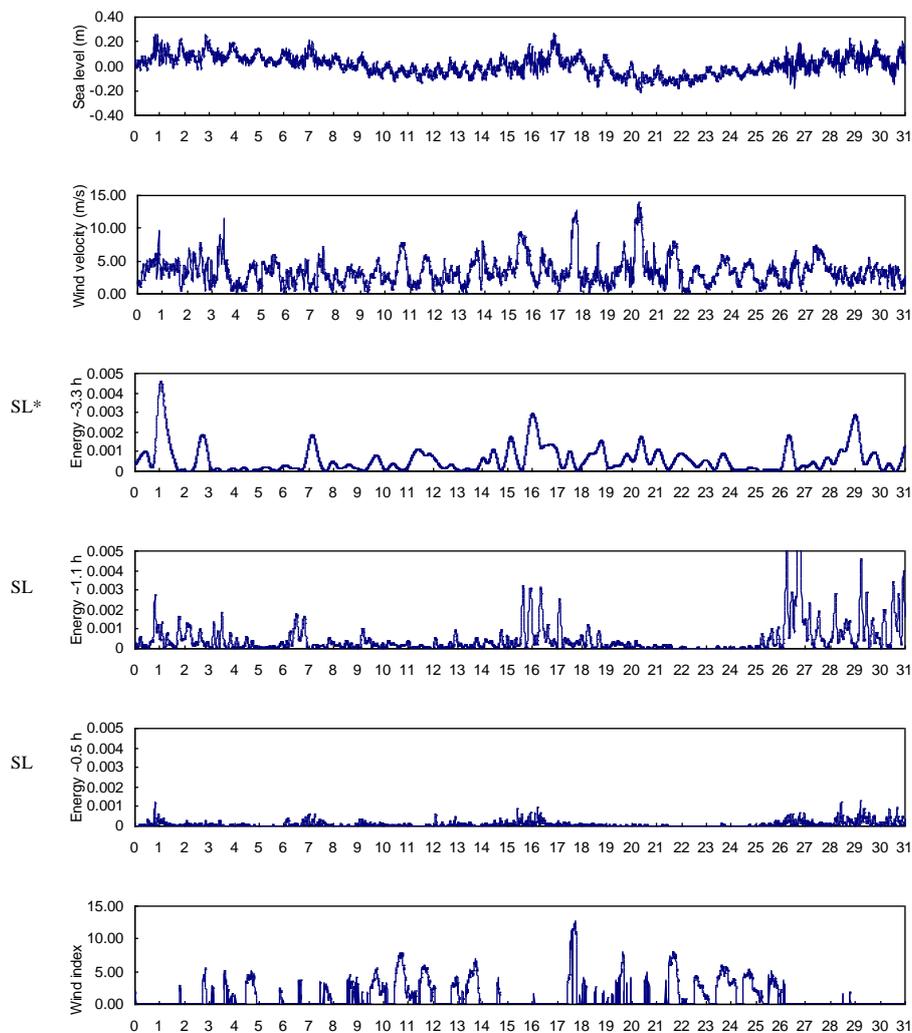
Con el objeto de verificar esta hipótesis, se ha representado la variación temporal de la velocidad del viento que proviene del SO y del NE, y esta se ha comparado con la variación temporal de la energía del nivel del mar en las frecuencias resonantes. (Ver esquema en figura siguiente). Se ha considerado que la línea de costa tiene una orientación de N35°E, que a efectos prácticos puede considerarse orientada al SE.



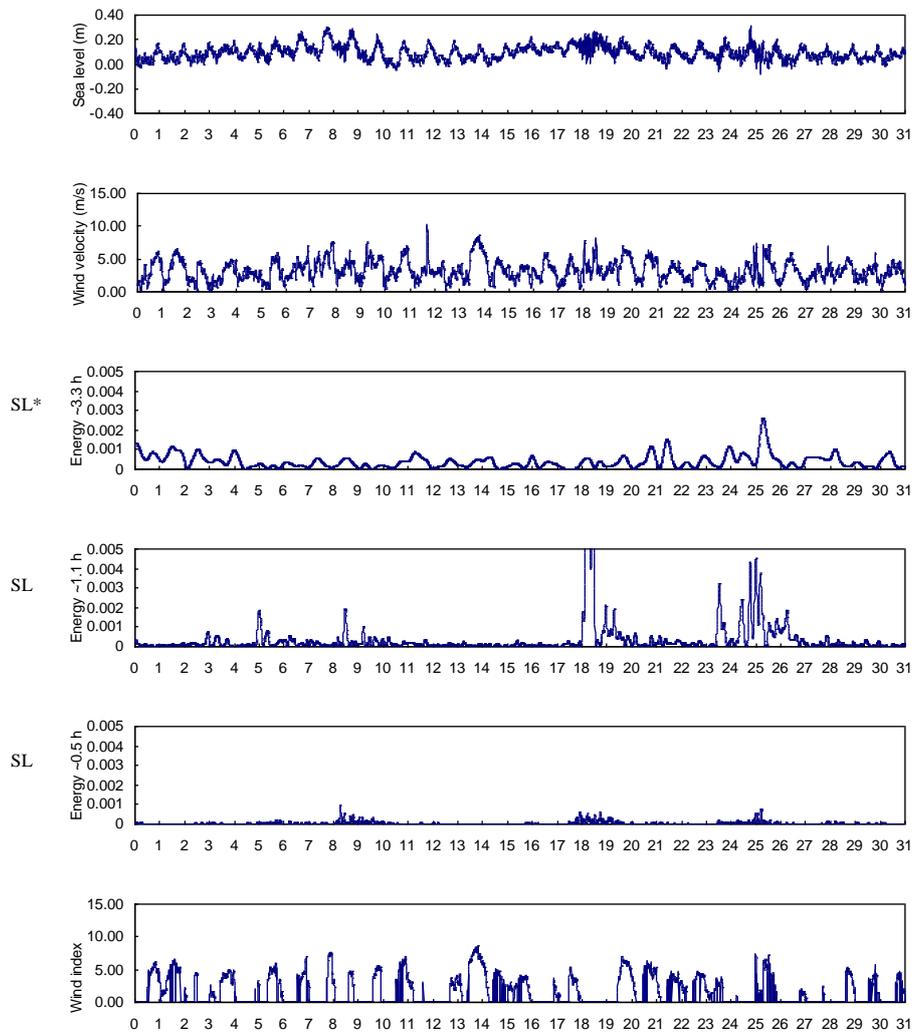
**Figura 6.14 Esquema de la hipótesis que considera velocidad y dirección del viento como mecanismos forzadores de la amplificación resonante en Alfacs y Fangar**

Imagen tomada de GoogleEarth

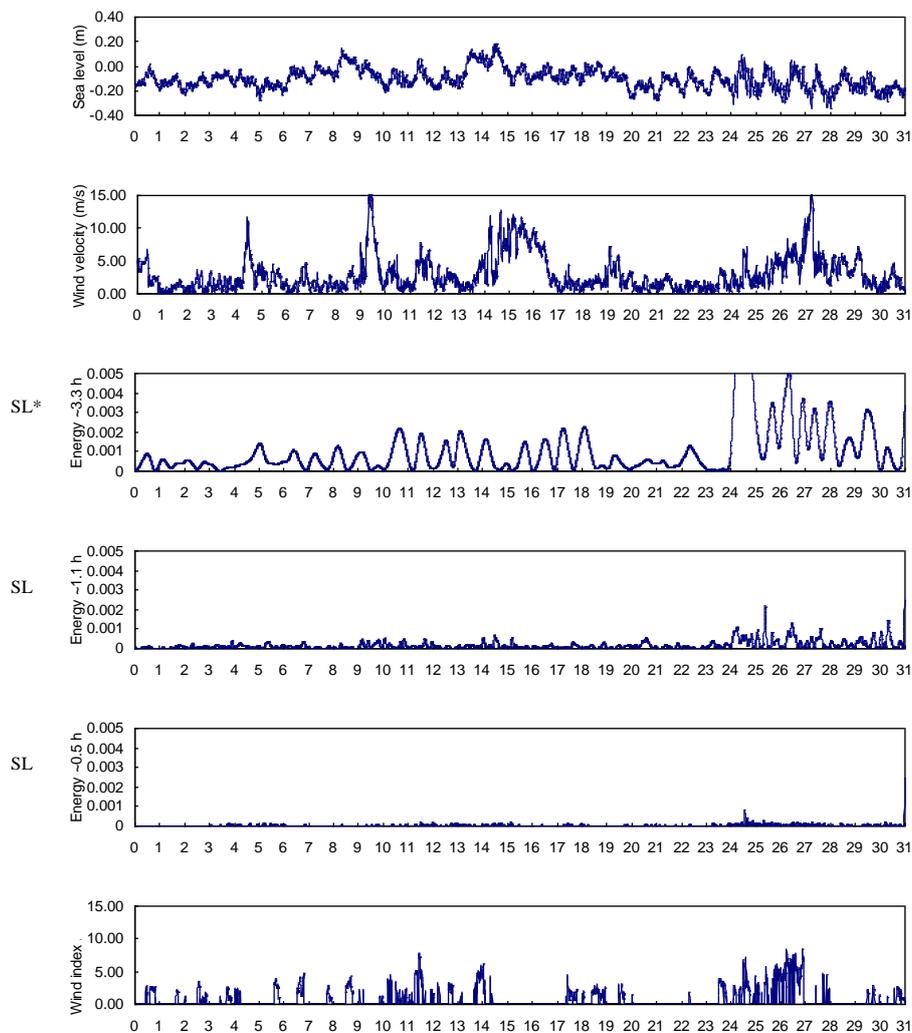
En las figuras siguientes se presenta la comparación de la variación temporal de la energía del nivel del mar en las frecuencias resonantes y la variación temporal de lo que se ha llamado Índice Viento Alfacs, que no es más que un filtro de los vientos que provienen del SO, y del Índice Viento Fangar, que es lo mismo pero de los vientos provenientes del NE.



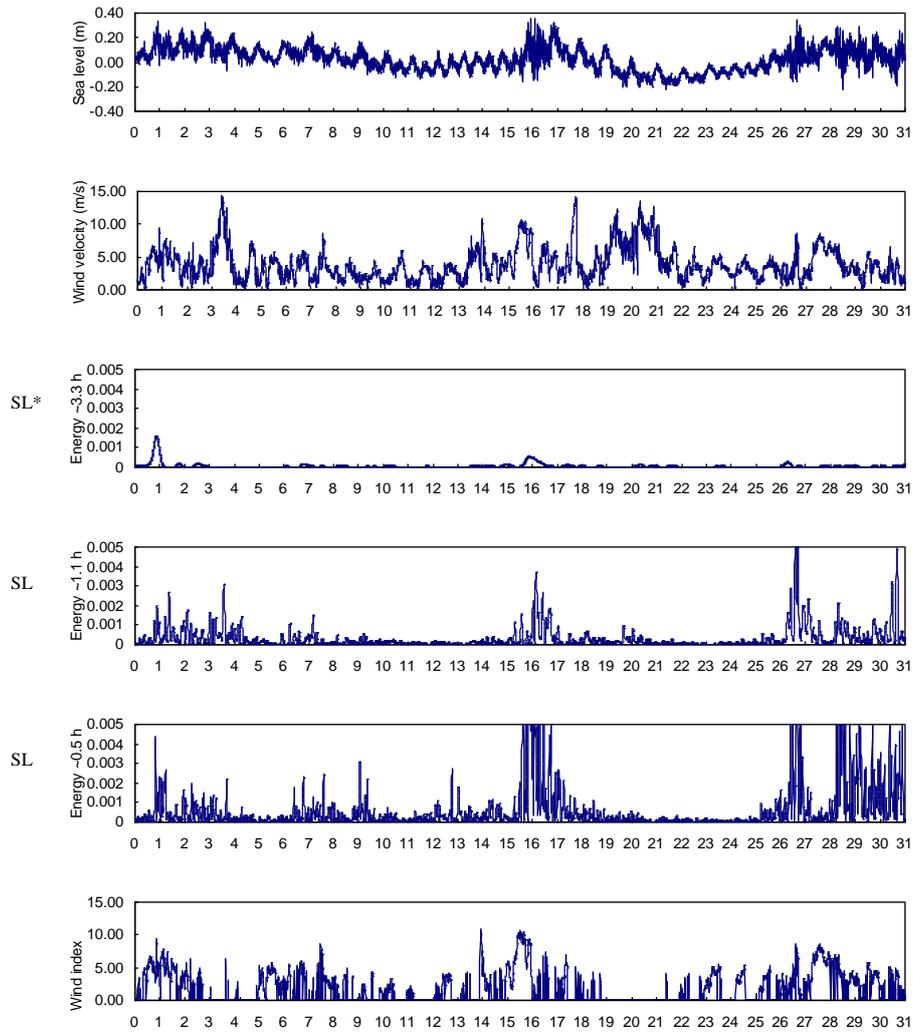
**Figura 6.15 Variación temporal de la energía en los modos resonantes durante MAYO de 1999 en Alfacs. Nivel del mar (SL) e Índice de viento Alfacs**



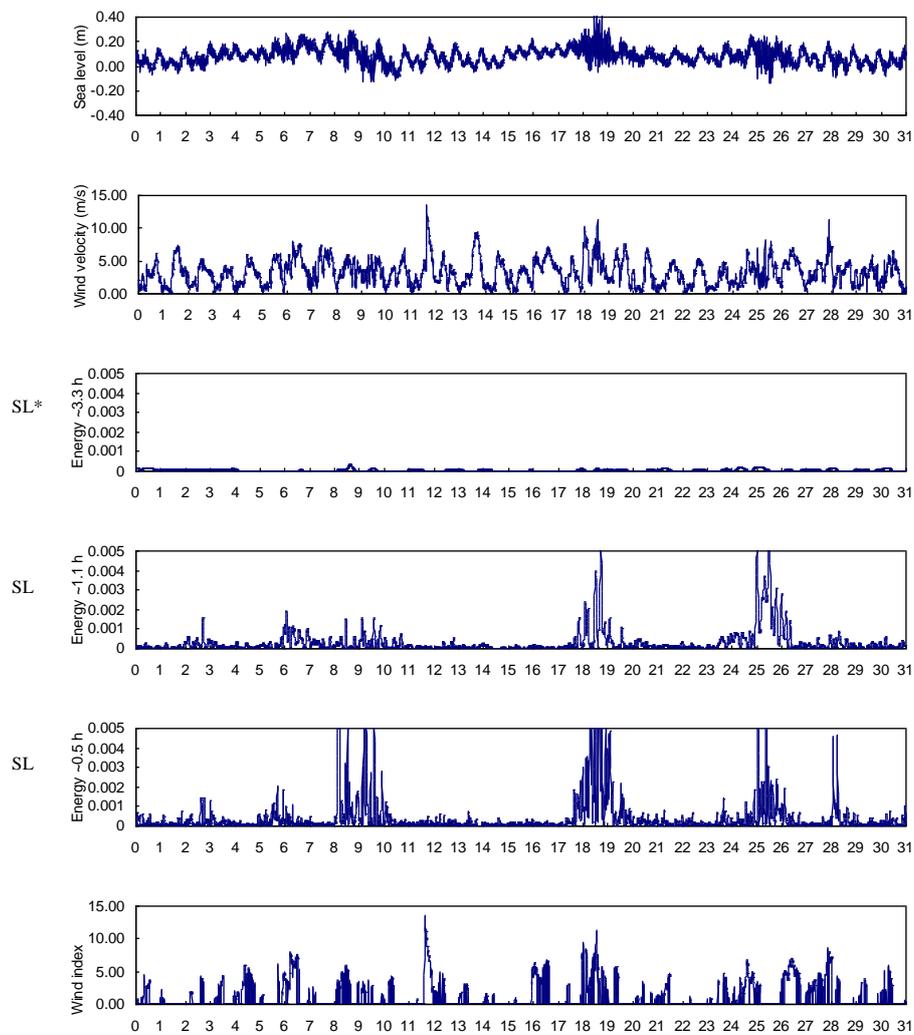
**Figura 6.16 Variación temporal de la energía en los modos resonantes durante AGOSTO de 1999 en Alfacs. Nivel del mar (SL) e Índice de viento Alfacs**



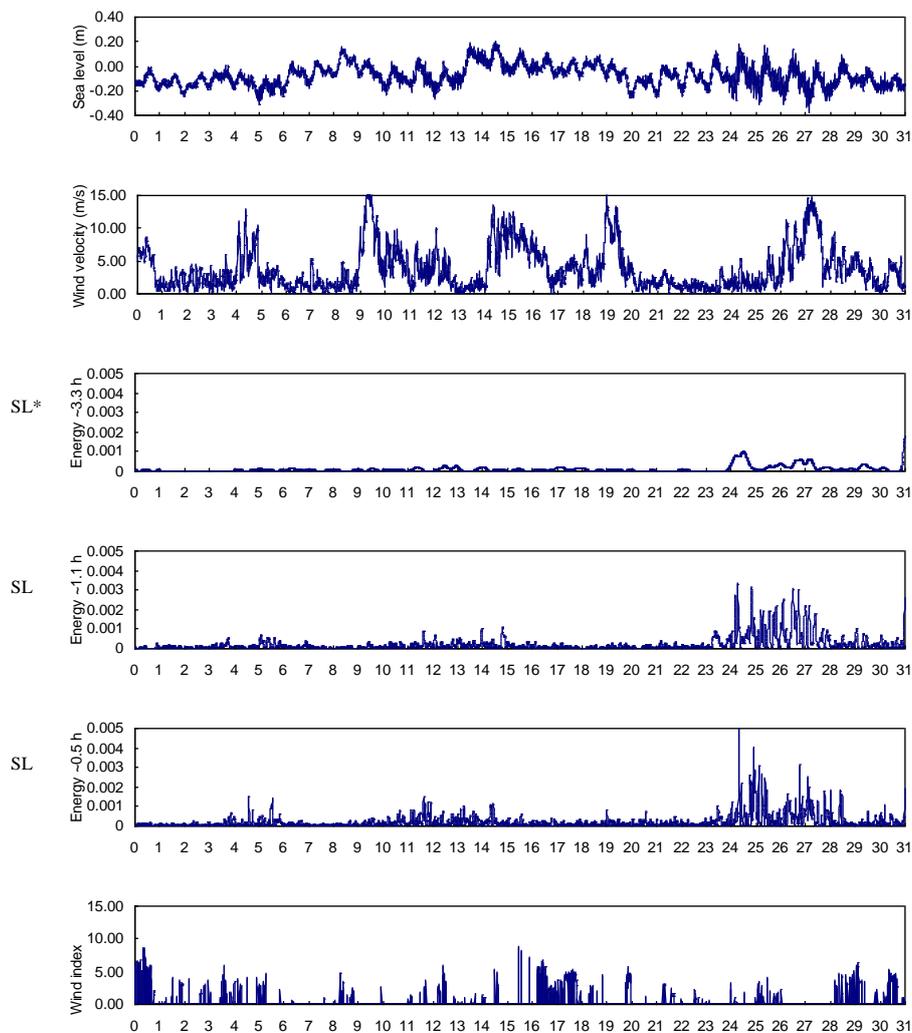
**Figura 6.17 Variación temporal de la energía en los modos resonantes durante DICIEMBRE de 1999 en Alfacs. Nivel del mar e Índice de viento Alfacs**



**Figura 6.18 Variación temporal de la energía en los modos resonantes durante MAYO de 1999 en Fangar. Nivel del mar e Índice de viento Fangar**



**Figura 6.19 Variación temporal de la energía en los modos resonantes durante AGOSTO de 1999 en Fangar. Nivel del mar e Índice de viento Fangar**



**Figura 6.20 Variación temporal de la energía en los modos resonantes durante DICIEMBRE de 1999 en Fangar. Nivel del mar e Índice de viento Fangar**

En todas las figuras es evidente que no existe relación alguna entre lo que se ha llamado Índice de Viento y las sobreelevaciones del nivel del mar en las frecuencias identificadas como resonantes en Alfacs y Fangar. El hecho de que aumenten las velocidades de viento en una dirección paralela a la costa no genera una consecuencia directa en la amplificación observada en ambas bahías. Es más, en algunos casos el efecto es contrario. Inicialmente se podría pensar que las características locales de los vientos, impuestas como ya se dijo por una cierta condición orográfica muy marcada al NO de Alfacs, podrían afectar el análisis. Esa influencia no se observa en los registros de l'Ampolla (bahía de Fangar) y, sin embargo, allí parece que tampoco existe una relación entre la velocidad y dirección del viento con los eventos resonantes.

También se observa en las figuras anteriores una disminución, en diciembre, de los vientos con dirección igual al eje principal de las bahías de Alfacs y Fangar. La razón de esto puede estar en la existencia en invierno de un mayor gradiente térmico entre el mar y la tierra, lo que favorece la generación de brisas. La fase positiva del WeMOi en este mes (Ver Figura 6.10) podría explicar también una mayor dirección del NO. Sin embargo, en mayo, también en fase positiva del WeMOi, no ocurre esto.

Por lo tanto, se puede concluir que no existe una relación entre el viento y la amplificación resonante en Alfacs y Fangar.

## **6.7 Conclusiones**

Parece existir una relación directa entre la dirección del viento en San Carles de la Ràpita y l'Ampolla y un índice que explica las oscilaciones meteorológicas del Mediterráneo Occidental, el WeMOi. En fase positiva, este índice indica vientos del NO, lo que se evidencia en los registros de estas dos localidades.

Por otra parte, ni la velocidad del viento, ni los vientos que soplan de ciertas direcciones, SO y NE para Alfacs y Fangar respectivamente, coinciden ni temporalmente ni en magnitud con el registro de esos eventos resonantes en ambas bahías. Los resultados encontrados sobre la influencia de la velocidad del viento en la amplificación resonante de las bahías de Alfacs y Fangar en las frecuencias de 3.3 h, 1.1 h y 0.5 h no han sido satisfactorios. La dirección del viento en el mismo sentido que el eje de las bahías parece que no es el mecanismo forzador de las *seiches* observadas. En relación con esto último, no existe dependencia temporal entre esa dirección y la ocurrencia de la sobreamplificación.

Como se dijo en el Capítulo 4, los fenómenos resonantes ocurren fundamentalmente en los meses de primavera y finales del verano. En los períodos de invierno y verano es cuando se observan las direcciones que, según la hipótesis planteada, podrían ser las generadoras de la resonancia en Alfacs y Fangar, pero eso no se evidencia en los resultados presentados en los apartados anteriores.

# **7. ANÁLISIS DE LOS POSIBLES MECANISMOS FORZADORES: PRESIÓN ATMOSFÉRICA. ANÁLISIS TEMPORAL**

## **7.1 Introducción**

Como ya se ha visto en el capítulo anterior, el viento no parece ser el mecanismo forzador de las *seiches* en Alfacs y Fangar. Por otra parte, la periodicidad del fenómeno resonante descrita en el Capítulo 4 hace concluir que las ondas que estamos estudiando y las consecuencias que ellas generan no sean precisamente tsunamigénicas.

De los mecanismos identificados inicialmente como factibles de generar estas ondas resonantes quedan dos: 1) La presión atmosférica y 2) Las ondas de borde. Con el objetivo

de ver si la primera de ellas puede contribuir con estos eventos, a continuación se hace un análisis de las series de tiempo de presión atmosférica en las dos bahías analizadas, Alfacs y Fangar, donde se han observado respuestas resonantes en diferentes momentos.

Ya Pernas (1992) presentaba la hipótesis de que los *seiches* en la costa catalana podían cumplir las características propuestas por Ramis y Jansà (1983), en las que relacionaban su generación con ciertas condiciones atmosféricas en el Atlántico y el Mediterráneo; básicamente este autor decía que la generación de *seiches* en Cataluña se debía a presión atmosférica. Esta conclusión la obtuvo para varios eventos comprendidos entre principios de los 70's y mediados de los 90's, cumpliéndose en un alto porcentaje de los casos. No obstante, en este caso de Alfacs y Fangar, se ha hecho un análisis diferente de la influencia de la presión atmosférica en la generación de las *seiches*. Se parte del análisis de las series de tiempo (fuentes analíticas) y se concluye en el siguiente capítulo con el análisis de campos de presión atmosférica en superficie (fuentes sinópticas y dinámicas).

El análisis realizado en este capítulo parte de observar la magnitud de la energía, tanto mediante un análisis de Fourier como de un análisis de la variación temporal de esa energía (o análisis *wavelet*). Posteriormente, en el siguiente capítulo, se hace un análisis de los mapas de presión atmosférica en superficie intentando encontrar patrones que expliquen los episodios resonantes observados durante 1999.

## **7.2 Posible relación entre los campos de presión atmosférica y las *seiches* de Alfacs y Fangar**

Muchas son las observaciones realizadas en el mundo sobre la relación entre perturbaciones atmosféricas y su acoplamiento con ondas en la superficie del mar, incluso de lagos y embalses, que generan una amplificación resonante (Figura 1.2). De esas perturbaciones, algunas están relacionadas con la velocidad del viento y otras con los campos de presión atmosférica. En el caso que nos ocupa, los campos de viento no son el mecanismo forzador

de las *seiches* observadas en Alfacs y Fangar. Analizaremos los campos de presión atmosférica.

Precisamente el fenómeno por el cual las ondas de presión atmosférica generan ondas en la superficie del mar se le conoce comúnmente como “barómetro inverso”, que no es más que la relación inversa entre la presión atmosférica y la elevación de la superficie del agua. La relación comúnmente aceptada indica que un aumento en 1 mb de la primera genera una disminución de 1 cm en la segunda, y viceversa. Cuando esas ondas generadas sobre la superficie coinciden con ciertas características geométricas del volumen donde se propagan, se genera la resonancia.

De todas esas ondas observadas en el mundo y que generan ese fenómeno resonante, la gran mayoría son producidas por el acoplamiento entre una onda de presión y la onda generada por ésta sobre la superficie del agua. La primera es producida a su vez por ondas gravitatorias atmosféricas generadas en la troposfera media por efecto de cizalladuras de viento que se manifiesta en superficie como oscilaciones periódicas de viento y presión atmosférica (Jansà, 1986; Jansà y Ramis, 1987). Esto es lógico: si la oscilación atmosférica se mueve, esto debe repercutir en las oscilaciones de la superficie del mar.

En ese sentido, la velocidad de movimiento de la onda de presión atmosférica es clave a la hora de determinar la respuesta del mar. Una explicación muy clara de esta relación puede ser encontrada en Gomis et al. (1993). Suponiendo un océano irrotacional y usando la teoría lineal para resolver las ecuaciones de onda larga, las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento son las siguientes:

$$\begin{aligned}
 \partial u / \partial t + g \partial (\eta + \phi) / \partial x + \gamma u &= 0 \\
 \partial v / \partial t + g \partial (\eta + \phi) / \partial y + \gamma v &= 0 \\
 \partial \eta / \partial t + \partial (Hu) / \partial x + \partial (Hv) / \partial y &= 0
 \end{aligned}
 \tag{7.1}$$

donde  $\phi$  es la perturbación de presión atmosférica dividida por  $\rho g$ ,  $\eta$  es la elevación de la superficie libre,  $u$  y  $v$  son las componentes de las corrientes inducidas,  $H$  es la profundidad y  $\gamma$  es un factor de fricción. Si se considera el caso de una bahía somera, estrecha y con el

---

fondo casi plano, como Alfacs y Fangar, donde las variaciones en la componente  $y$  son despreciables y  $H$  puede ser asumida como constante, la ecuación queda:

$$\partial^2 \eta / \partial t^2 - gH \partial^2 \eta / \partial x^2 + \gamma \partial \eta / \partial t = gH \partial^2 \phi / \partial x^2 \quad (7.2)$$

La respuesta a la solución  $\eta$  a una perturbación de presión atmosférica en la dirección  $x$ , es:

$$\phi = PF(x)e^{i\omega t} \quad (7.3)$$

donde  $\omega$  es la frecuencia angular. En la ecuación 7.3 están representados tanto la onda estacionaria como la onda progresiva. Asumiendo la forma de la onda como sigue:

$$\eta = AE(x)e^{i(\omega t - \psi)}. \quad (7.4)$$

la ecuación 7.2 queda de la siguiente manera:

$$Ae^{-i\psi} \left[ \frac{d^2 E(x)}{dx^2} + \frac{(\omega^2 - i\gamma\omega)}{gH} E(x) \right] = -P \frac{d^2 F(x)}{dx^2} \quad (7.5)$$

donde  $\psi$  es la diferencia de fase entre la onda de presión atmosférica y la onda del mar. De la ecuación 7.5 se deduce que  $E(x)$  debe ser de la misma forma y tener el mismo número de onda  $k$  que  $F(x)$ , ya sea como una función exponencial compleja o una función real. Para ambos casos, la relación entre las amplitudes de las ondas  $A$  y  $P$  está dada por:

$$Ae^{-i\psi} = P \frac{gH}{[(\omega^2/k^2) - gH] - (i\gamma\omega/k^2)} \quad (7.6)$$

Asumiendo que  $\gamma \ll \omega$ , la resonancia ocurre cuando  $\omega/k \approx (gH)^{1/2}$ . La amplitud de la resonancia es proporcional a  $\omega/\gamma$  y la diferencia de fase es  $\psi = -\pi/2$ . Cuando  $\omega/k < (gH)^{1/2}$ ,  $A$  se aproxima a  $P$  con una diferencia de fase  $\psi = -\pi$ , que es la respuesta del barómetro inverso,

---

ya explicado en párrafos anteriores. En el caso en que  $\omega/k > (gH)^{1/2}$ ,  $A$  se aproxima a cero en fase con la onda de presión atmosférica. El factor de fricción es importante en la medida en que evita que la amplitud de la onda se aproxime a infinito y suaviza la pendiente del espectro de diferencias de fase.

Dicho esto, es claro que el posible acoplamiento entre las ondas de presión atmosférica y las ondas resonantes observadas en Alfacs y Fangar debe ser analizado desde dos puntos de vista. Por un lado, para verificar dicho acoplamiento es importante analizar la correlación que existe entre ambas señales. Por otra parte, es necesario establecer la diferencia de fase entre ellas, sobre todo en las frecuencias resonantes. En este capítulo se hace énfasis en estos dos aspectos.

### **7.3 Comportamiento de la presión atmosférica en la zona Mediterránea**

En aras de establecer un marco de referencia en el análisis de la presión atmosférica en Alfacs y Fangar, objetivo del presente capítulo, se hace en este apartado una caracterización del comportamiento de esta variable en toda la zona Mediterránea española.

En el Capítulo 6 se explicaron los diferentes aspectos que gobiernan la climatología de la Península Ibérica. En particular, en el apartado 6.2.1 se explicó de manera general la meteorología a escala sinóptica y de mesoescala de la misma, con el fin de relacionarla con la generación de vientos y la variación temporal y espacial de los mismos en la Península y la zona Mediterránea en particular.

Haciendo énfasis en la relación de dichos aspectos con la presión atmosférica, a continuación se presenta un apartado en el que se explica con más detalle este comportamiento climático.

La Península Ibérica se encuentra en una posición meridional de la zona de circulación general del Oeste y, por tanto, recibe influencias dinámicas del Atlántico y al mismo tiempo

de la zona Subtropical. Si se considera además que puede haber influencia de condiciones climáticas de Europa, del Norte de África y de la zona Occidental del Mediterráneo, la cantidad de situaciones atmosféricas es muy amplia. Véase en la Figura 6.1 una clara ilustración de las diferentes masas de aire que pueden llegar a la Península.

En detalle, esto quiere decir que la climatología general de la Península Ibérica está estrechamente relacionada con la localización de varias zonas de presiones extremas.

Por un lado, unas zonas de alta presión o anticiclones, en las que el aire gira en el sentido de las agujas del reloj. De estas, cabe mencionar las siguientes:

- *El Anticiclón de las Azores.* Es la zona que más afecta a la Península Ibérica. Tiene sus orígenes en las altas presiones subtropicales que se desplazan hacia el Norte y hacia el Sur. Cuando se sitúa al Norte provoca tiempo estable en la Península, lo que normalmente ocurre en verano. En otoño e invierno esta zona desciende hacia al Sur y se produce un tiempo inestable. Es el causante de la entrada de vientos cálidos en la Península Ibérica.
- *Anticiclones polares atlánticos.* Son una prolongación del Anticiclón de las Azores en su parte septentrional y ejercen su influencia en invierno, arrastrando aire polar marítimo y provocando situaciones del Norte.
- *El anticiclón Siberiano.* Se forma en Siberia a partir de masas de aire frío polar continental. Al trasladarse por zonas continentales, este anticiclón genera vientos secos y proporciona la creación de fuertes heladas en el interior y nevadas en las costas si se asocia a una borrasca Mediterránea en invierno.

Además, sobre la Península Ibérica se observan situaciones atmosféricas de baja presión que definen el clima en las diferentes regiones y, en particular, en la zona Mediterránea.

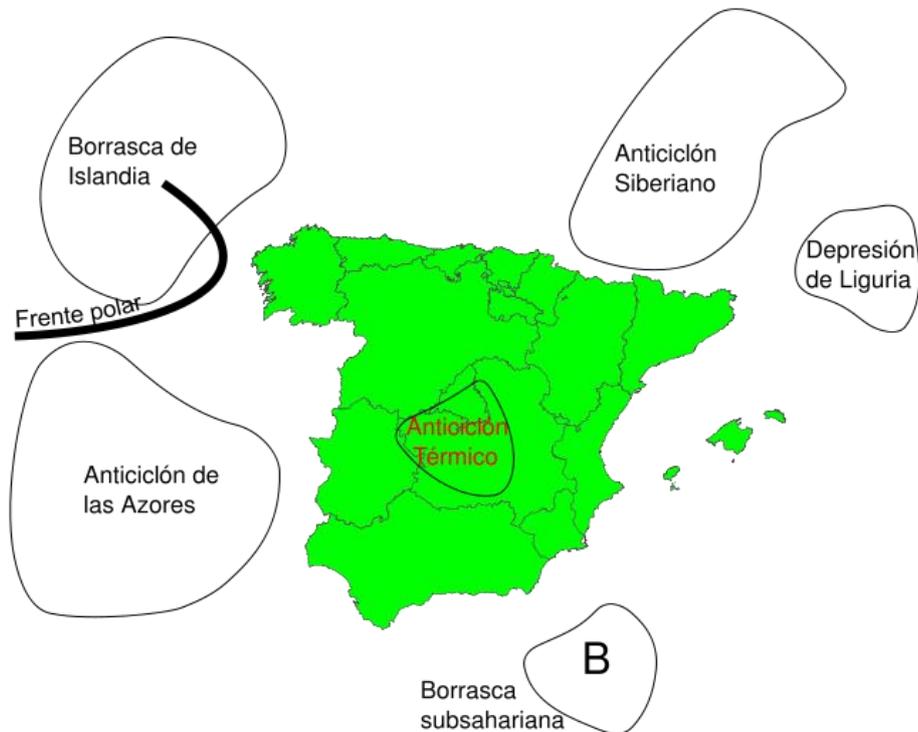
- *La depresión Atlántica o borrasca de Islandia.* Se asocia al aire polar marítimo que sobre todo en invierno, otoño y primavera provoca lluvias en la península.
- *La depresión sahariana o borrasca subsahariana.* Originada por el fuerte calor que provoca que el aire caliente ascienda y contacte con zonas más frías y provoque

inestabilidad. Un anticiclón en altura da lugar a olas de calor. En el interior de la Península se presentan depresiones del mismo tipo que esta, sobre todo en verano. A diferencia de otras depresiones que son de origen dinámico, estas depresiones son de origen térmico.

- *La depresión de Génova o depresión de Liguria o la Baja Balear.* Se constituye en los meses de otoño. El proceso de formación surge a partir de masas de aire frío continentales que al llegar al mar se cargan de humedad y provocan una fuerte inestabilidad y crea la gota fría. En los meses de invierno expulsa por su borde trasero la masa de aire polar continental hacia la Península y Baleares, ocasionando condiciones extremas en el mar Balear y nevadas en las costas de Cataluña, Baleares y el Cantábrico Oriental.
- *La depresión de las Baleares.* Se provoca por el choque entre la masa de aire frío polar con masas más calientes creando inestabilidad. Estas depresiones son muy comunes en la formación de las borrascas que entran por el golfo de Cádiz.

Estos centros de acción climática que actúan sobre la Península Ibérica se muestran esquemáticamente en la siguiente figura.

En resumen, el clima de la Península Ibérica está influenciado de manera general por varios sistemas: Atlántico, Continental y Mediterráneo. Por un lado, el sistema del Atlántico Norte, definido por la zona de baja presión de Islandia y el Anticiclón de Las Azores y con una oscilación climática de largo período llamada NAO. Por otro, el sistema del Mediterráneo Occidental, determinado por una zona ubicada sobre el Norte de Italia que varía entre altas y bajas presiones y que puede o no estar relacionado con las zonas de alta y baja presión que se localizan en la Península Ibérica y sobre todo sobre el mar Balear. La variabilidad de este sistema ha sido caracterizada por el WeMOi. Precisamente este último sistema, de menor escala espacial que el primero, tiene una mayor relación estadística con el clima del mar Balear (López, 2007). Por último, los sistemas siberianos, saharianos e ibéricos, básicamente térmicos y no dinámicos como los otros dos anteriores.



**Figura 7.1 Centros de acción climática de la Península Ibérica**

Estos centros de acción generan unas condiciones climáticas muy particulares en la Península Ibérica. En ese sentido, los sistemas que actúan sobre las condiciones de presión atmosférica son muy importantes. Y, por otra parte, como ya se mencionó en el Capítulo 6, si bien existen patrones estacionales de dicha variable, también se aprecia una variabilidad climática de escala mayor que los años que la modifica. Dichos patrones de variabilidad están asociados con el fortalecimiento o debilitamiento de los campos de presión atmosférica en el Atlántico Norte, lo que genera una mayor o menor diferencia entre las zonas de alta y baja presión de Islandia y las Azores, respectivamente. A este dipolo se le ha llamado North Atlantic Oscillation (NAO). En algunas zonas donde este índice no tiene mucha influencia, como en el litoral del mar Balear, se ha propuesto el índice WeMOi (Western Mediterranean Oscillation Index) que, según López (2007) muestra una mejor correlación con el clima y, en particular, con la precipitación que ocurre sobre esta zona Mediterránea. Precisamente el

fortalecimiento o debilitamiento de ambos dipolos está directamente relacionado con las condiciones de presión atmosférica sobre el mar Balear y, por ende, con el fortalecimiento o debilitamiento de los centros de acción mencionados anteriormente.

## **7.4 Presión atmosférica en Alfacs y Fangar**

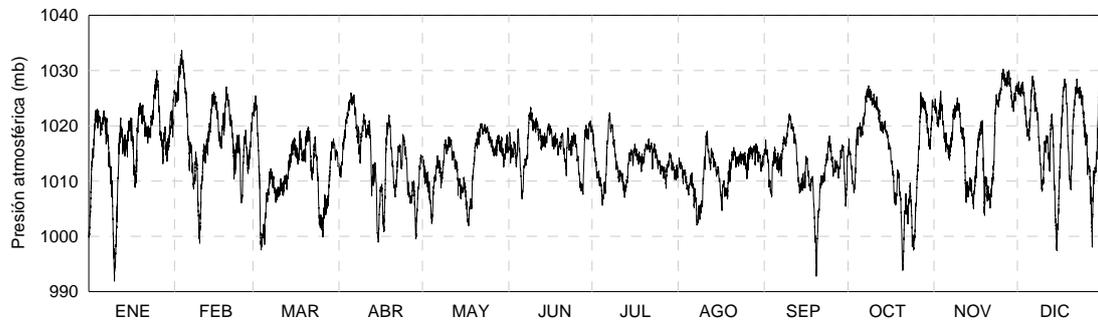
Como se ha dicho, se ha hecho un análisis temporal y un análisis espacial de la presión atmosférica en la zona de estudio. Cada uno de estos dos análisis se ha basado en dos tipos de datos. En este capítulo se aborda el análisis temporal, por cuanto los datos utilizados son series de tiempo. El siguiente capítulo presenta el análisis espacial de la presión atmosférica en el mar Mediterráneo español.

### **7.4.1 Estaciones de registro**

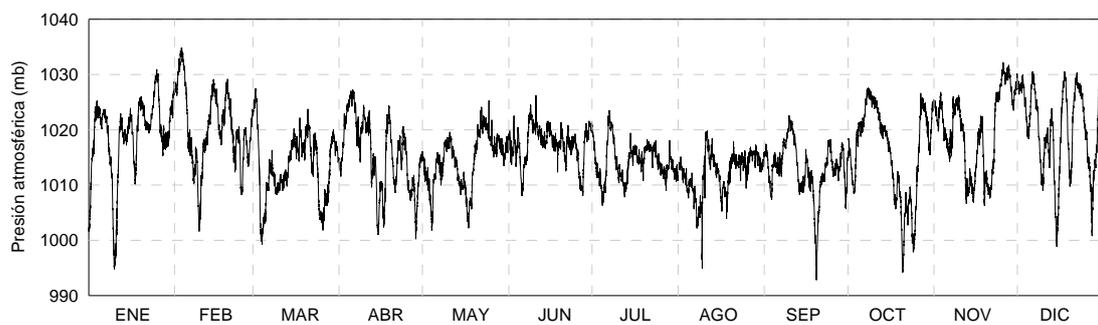
Se han analizado los registros de presión atmosférica en San Carles de la Rápita (Alfacs) y l'Ampolla (Fangar). Los instrumentos, estaciones automáticas Aanderaa AWS 2700, registran cada 10 minutos datos esta variable, tal como se describió en el capítulo anterior (Figura 6.8). El período de tiempo analizado incluye desde 1997 hasta 2002. Los datos analizados son los del año 1999, que coinciden con el período de tiempo de los registros de nivel del mar analizados en ambos sitios.

### **7.4.2 Series de tiempo de presión atmosférica en Alfacs y Fangar**

Las figuras siguientes presentan la variación temporal de los datos de presión atmosférica en superficie, registrados durante 1999 en Alfacs y Fangar. Como era de suponer, por la cercanía de las dos estaciones, los dos registros de presión atmosférica son prácticamente iguales.



**Figura 7.2 Variación temporal de presión atmosférica en San Carles de la Ràpita, bahía de Alfacs**



**Figura 7.3 Variación temporal de presión atmosférica en l'Ampolla, bahía de Fangar**

La presión atmosférica varía en una escala espacial mucho más grande que la distancia entre los dos instrumentos.

Nótese que en las gráficas anteriores se observa una mayor variabilidad de la presión en los meses de otoño e invierno, con diferencias entre las mayores y menores presiones de 30 mb en cinco días. Las diferencias en verano son de 10 mb, como mucho, en el mismo período de tiempo. En cualquier caso, se aprecia una modulación de entre 5 y 10 días en la presión atmosférica, que coincide con la misma frecuencia observada en las ondas resonantes de Alfacs y Fangar.

---

Con el objeto de verificar si las series de presión atmosférica mostradas en las figuras anteriores son homogéneas estadísticamente, o lo que es lo mismo, tienen una calidad que permite trabajar con ellas sin incurrir en errores por posibles variaciones anómalas, se ha hecho un análisis para buscar cambios en la media o en la varianza. Las pruebas utilizadas son las mismas que para el análisis de las series de nivel del mar y velocidad del viento (Wilcoxon y Levene, respectivamente para cambios en la media y la varianza). La tabla siguiente presenta los resultados de este análisis.

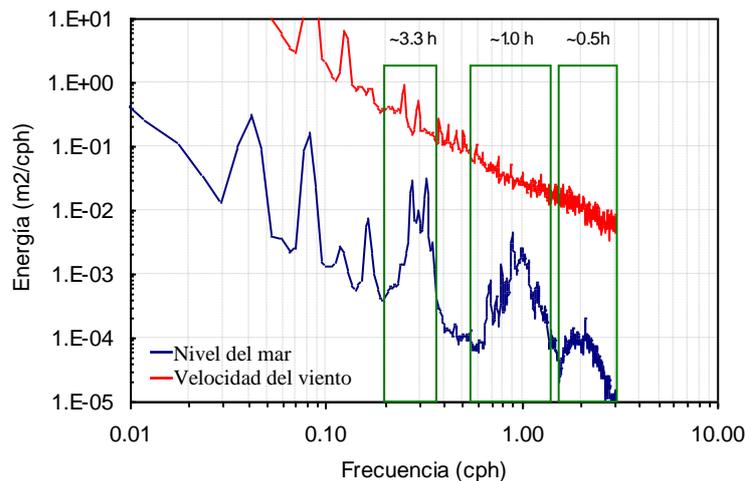
**Tabla 7.1. Parámetros estadísticos y análisis de calidad de la serie de presión atmosférica de San Carles de la Ràpita y l’Ampolla**

<b>Parámetros</b>	<b>San Carles de la Ràpita</b>	<b>l’Ampolla</b>
Cantidad de datos	52560	52560
Media (mb)	1015.20	1016.29
Máximo (mb)	1033.62	1034.80
Mínimo (mb)	991.90	992.84
Desviación (mb)	6.35	6.48
Cambio en la media	Salto en la media desde agosto	Salto en la media desde agosto
Cambio en la varianza	No hay cambio en la varianza	No hay cambio en la varianza

Como se explicó en los capítulos 4 y 6, el salto en la media de agosto está más relacionado con la estacionalidad de la serie que con un evento que obligue a descartar los datos. Por lo tanto, se acepta que no existen comportamientos anómalos en los registros de presión atmosférica, por lo que se continúa con el análisis de los mismos.

## 7.5 Análisis espectral de la presión atmosférica en Alfacs y Fangar

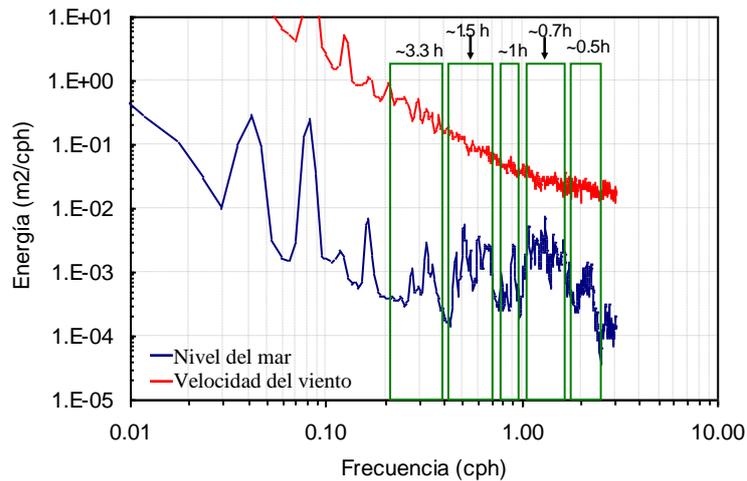
A continuación se hace el análisis espectral de Fourier de las series temporales de presión atmosférica en San Carles de la Ràpita (Alfacs) y l'Ampolla (Fangar). En este caso, como en el análisis de nivel del mar, también se han utilizado 512 puntos. Estos resultados se han comparado con los mismos espectros de nivel del mar de ambos sitios presentados en el Capítulo 4. Las siguientes figuras muestran esos resultados.



**Figura 7.4 Espectro de Fourier de las series de presión atmosférica y nivel del mar durante 1999 en San Carles de la Ràpita, bahía de Alfacs**

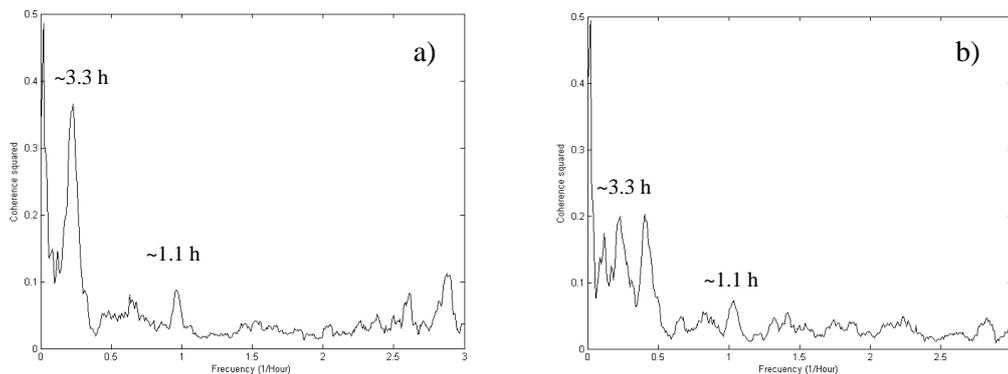
Nótese que, a diferencia de lo que ocurre con la frecuencia de 3.3 h en Alfacs y, en menor medida en Fangar, las demás frecuencias resonantes no parecen estar relacionadas directamente con ondas de presión atmosférica del mismo período. En ambas bahías, para  $T=3.3$  h, se observan sendos picos de energía, en la misma frecuencia, en las series de presión atmosférica. Esto podría sugerir una relación directa entre una onda de presión atmosférica y la onda de nivel del mar en esa frecuencia. Pero falta explicar qué ocurre con las ondas de menor período que, como ya se vio en el Capítulo 4, coinciden con los modos

resonantes principales de las dos bahías y que, en muchos casos, coinciden en el tiempo con aquella.



**Figura 7.5 Espectro de Fourier de las series de presión atmosférica y nivel del mar durante 1999 en l'Ampolla, bahía de Fangar**

Con el objetivo de buscar más argumentos coincidentes entre las dos señales, nivel del mar y presión atmosférica, en Alfacs y Fangar, se han construido los espectros de coherencia entre señales, tal como muestra la siguiente figura.



**Figura 7.6 Coherencia de señales de presión atmosférica y nivel del mar durante 1999 en a) San Carles de la Ràpita, Alfacs y b) l'Ampolla, Fangar**

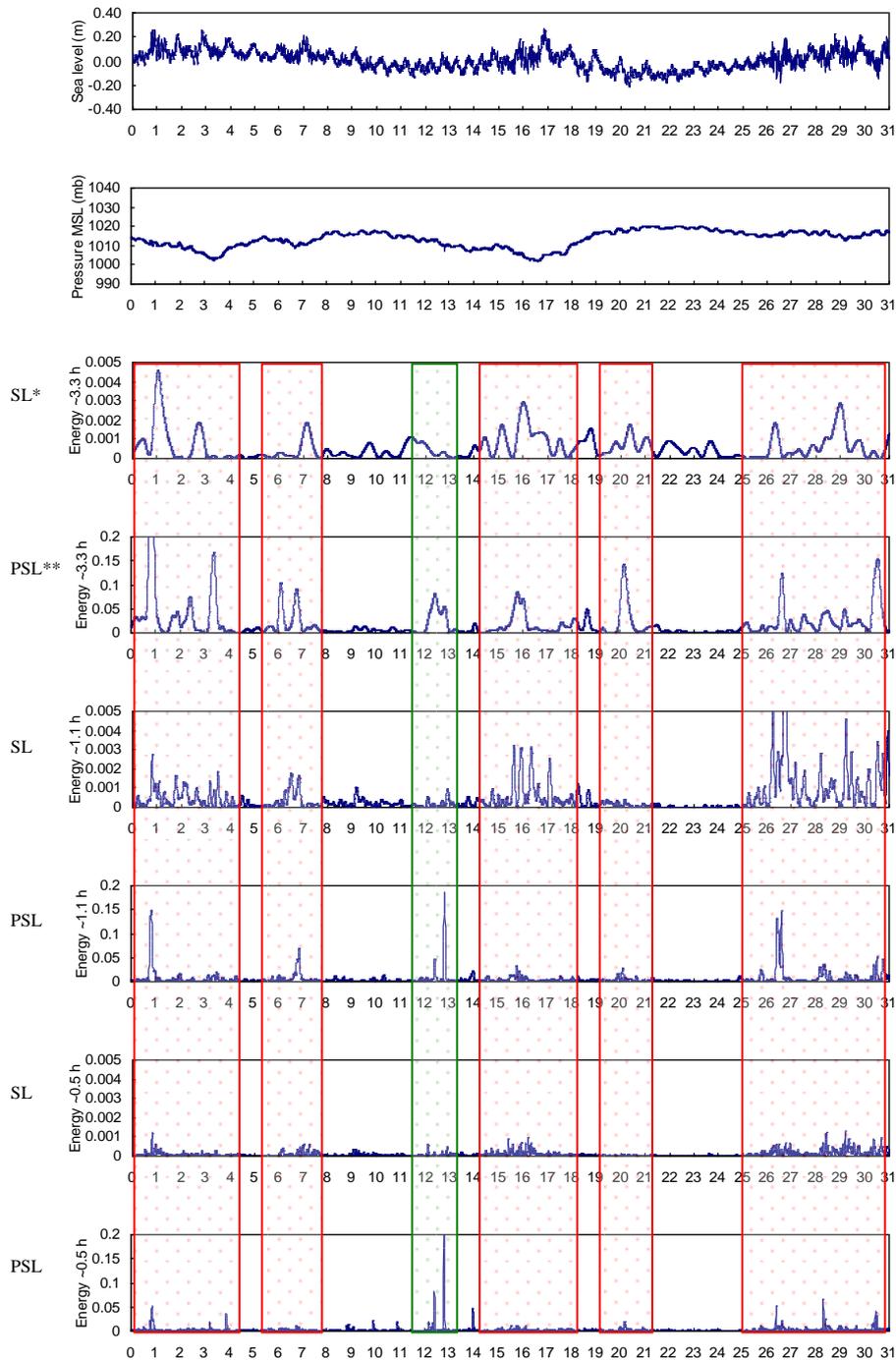
En la anterior figura se puede ver con mayor claridad lo que se había visto en la comparación de los espectros de energía: Una alta coherencia entre las ondas de presión atmosférica y nivel del mar en 3.3 h de período. No obstante, algo no apreciado a simple vista en aquellas gráficas indica que puede haber cierta coherencia también en ondas de presión atmosférica y nivel del mar en el período de 1.1 h en ambos registros.

## **7.6 Análisis temporal de la presión atmosférica en Alfacs y Fangar**

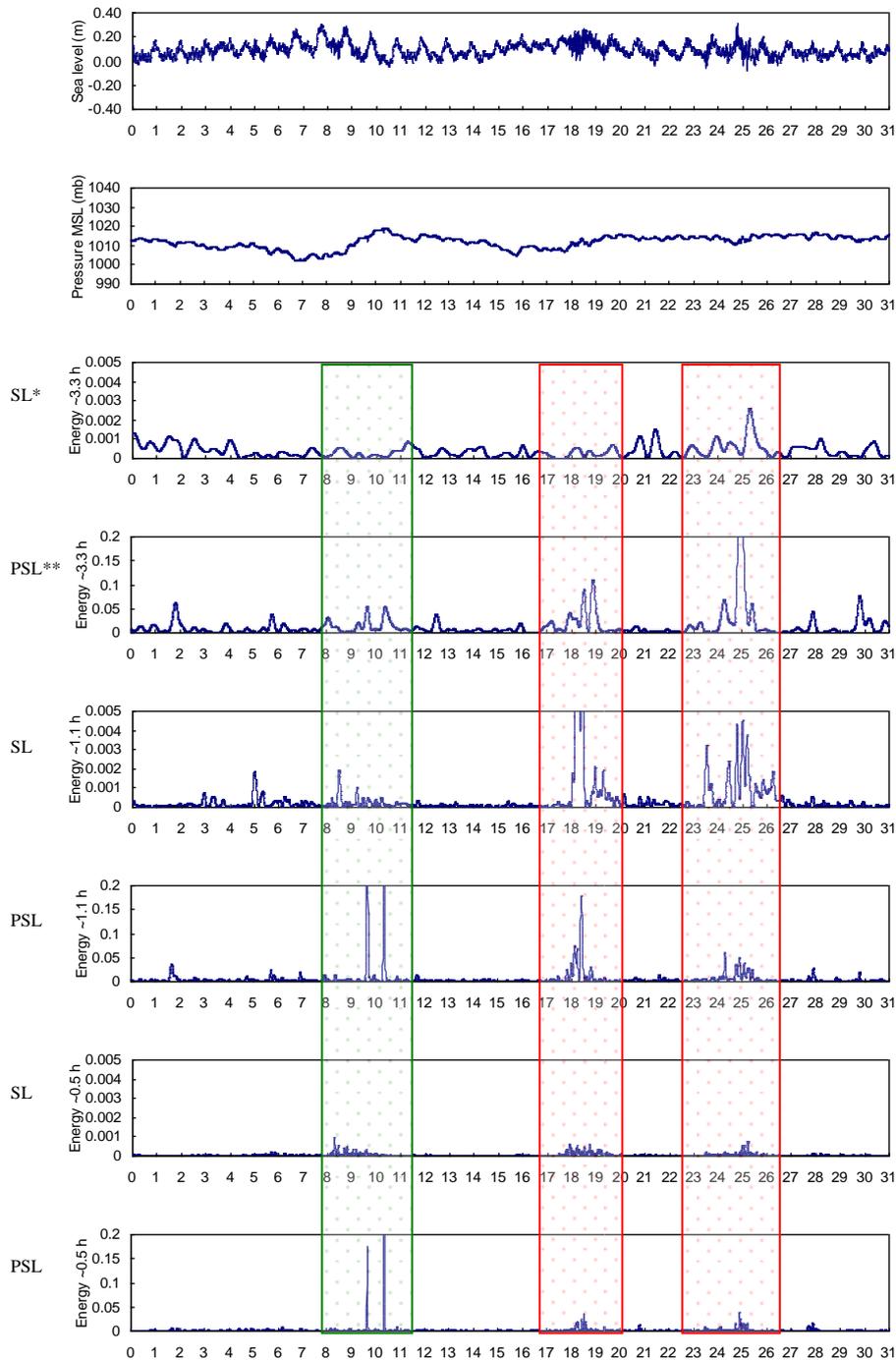
No obstante las anteriores conclusiones, es necesario establecer si esa relación entre ambas señales, nivel del mar y presión atmosférica en Alfacs y Fangar, se mantiene en el tiempo. Si bien se podría hacer un análisis de coherencia entre señales para cada uno de los meses del año, éste apenas podría mostrar la relación frecuencial de las dos señales, nunca podría verse la relación en magnitud entre las diferentes frecuencias. Precisamente para lograr apreciar si la relación entre las frecuencias analizadas de ambas señales se mantiene en el tiempo, se ha realizado un análisis *wavelet* (ver teoría en el Capítulo 4) mensual de esas frecuencias. A continuación se presentan los resultados tanto para los registros de San Carles de la Ràpita (Alfacs) como de l'Ampolla (Fangar).

Atendiendo a la evidencia encontrada en capítulos anteriores, de que se observa una coincidencia temporal en las amplificaciones resonantes de igual frecuencia en ambos sitios, el análisis que se realiza a continuación se hace conjuntamente.

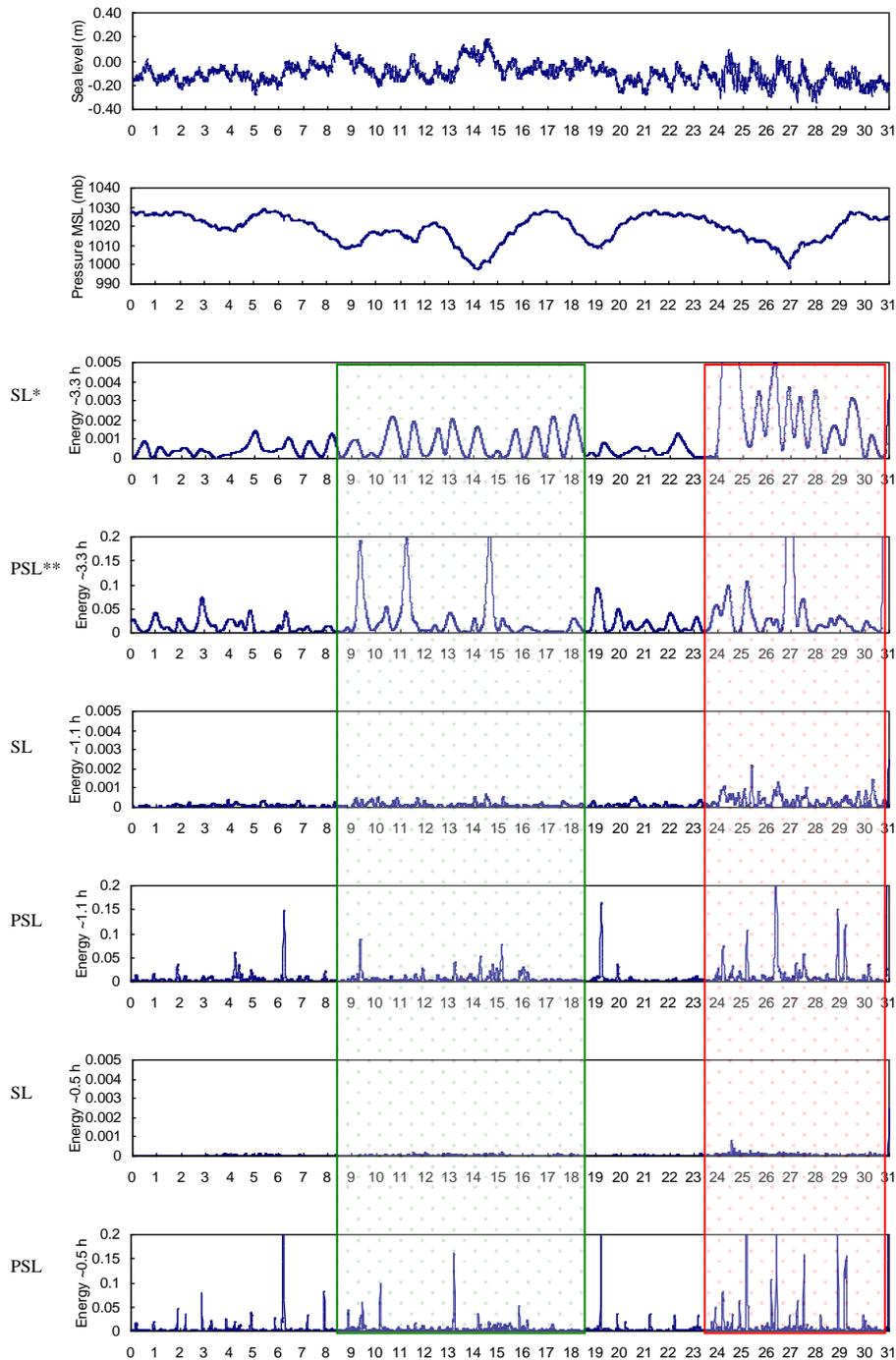
En las gráficas se han marcado, en rojo, los períodos de tiempo en los que parece evidente la relación entre presión atmosférica y nivel del mar en cada una de las frecuencias analizadas, y en verde los períodos en los que no se observa coincidencia alguna entre cualquiera de las frecuencias de presión atmosférica y su correspondiente en nivel del mar. En el Anexo 3 se presentan los resultados de los demás meses del año 1999.



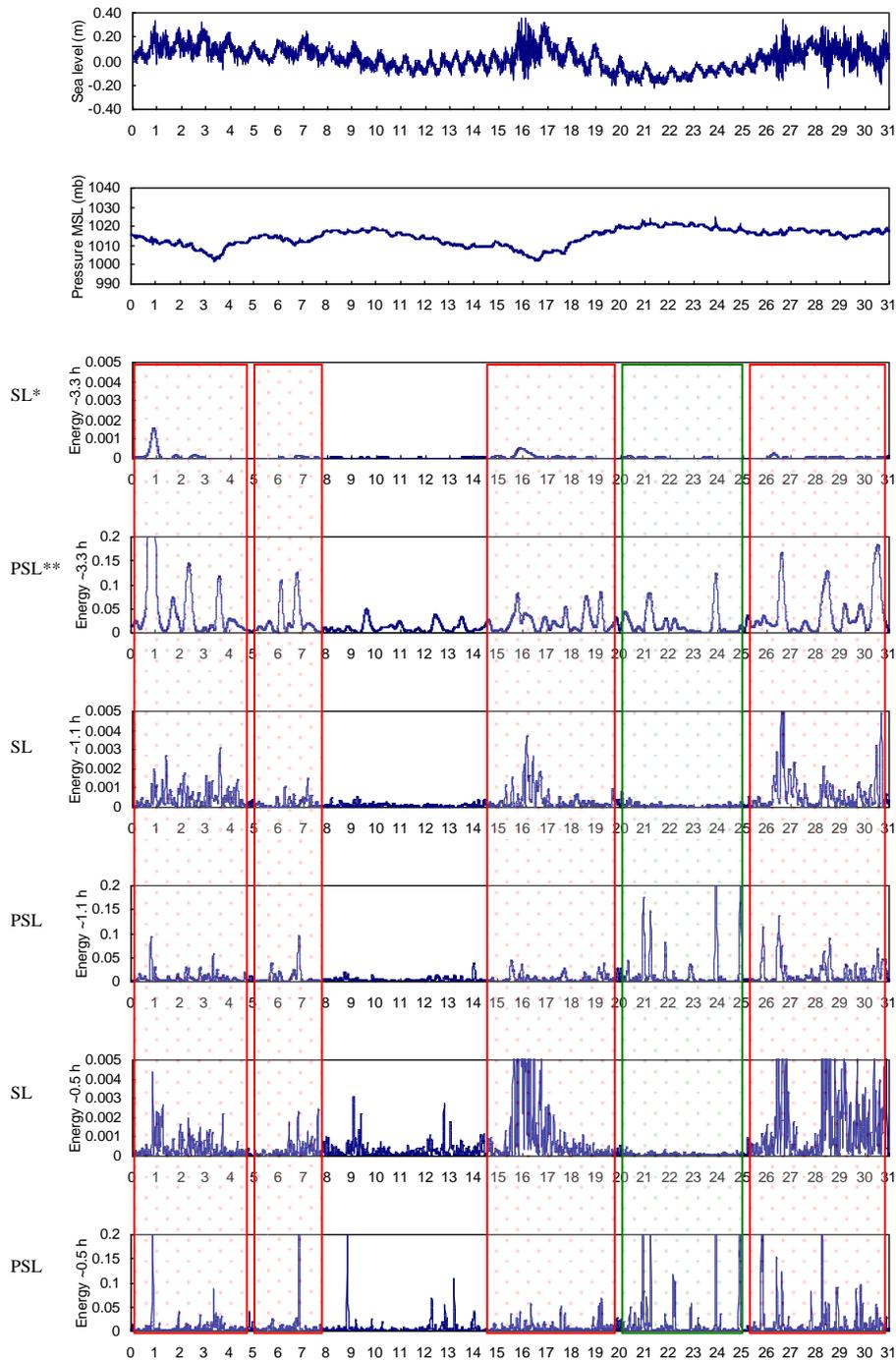
**Figura 7.7** Variación temporal de la energía en los modos resonantes durante MAYO de 1999 en Alfacs. Nivel del mar (SL) y presión atmosférica (PSL)



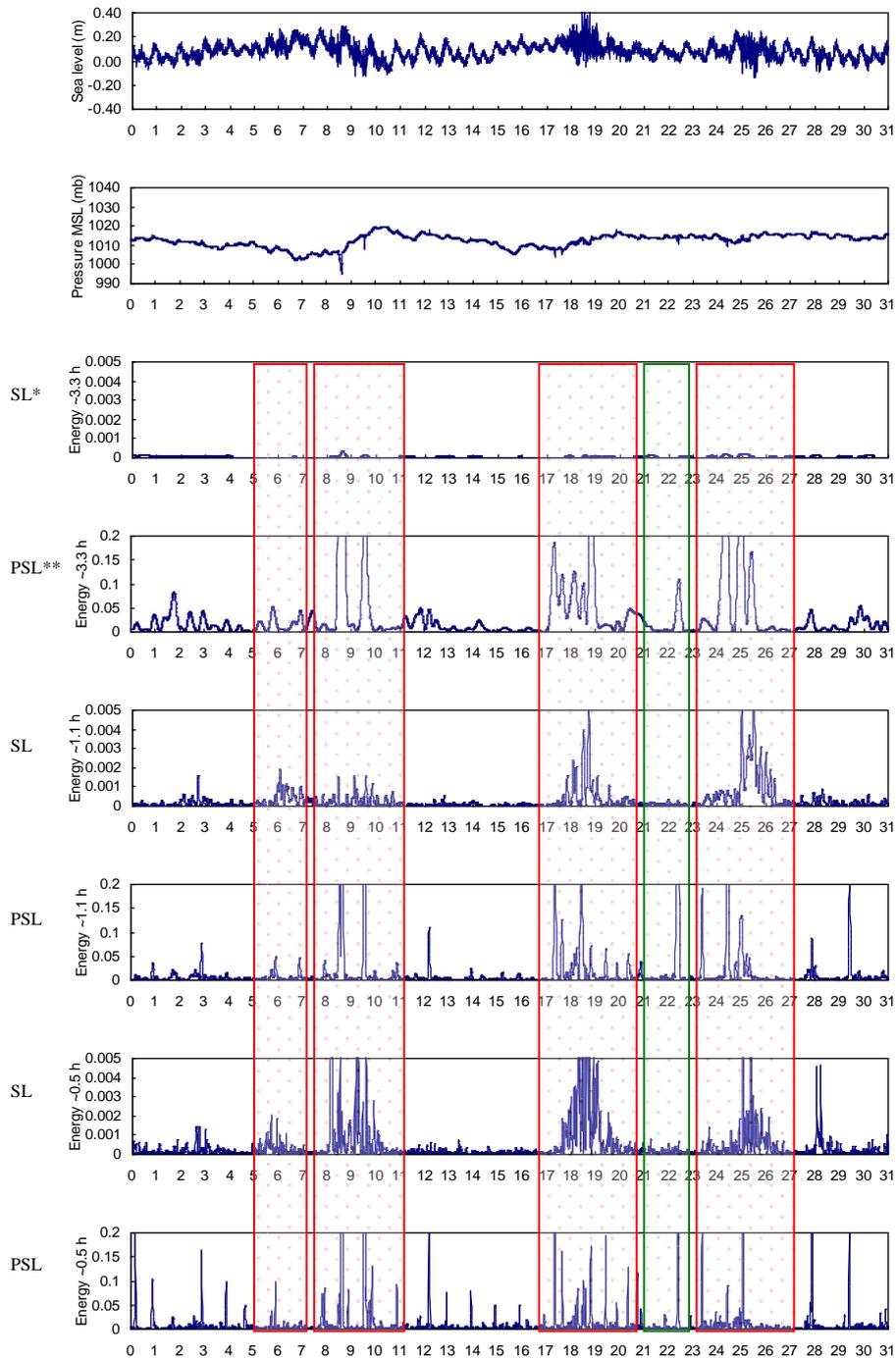
**Figura 7.8** Variación temporal de la energía en los modos resonantes durante AGOSTO de 1999 en Alfacs. Nivel del mar (SL) y presión atmosférica (PSL)



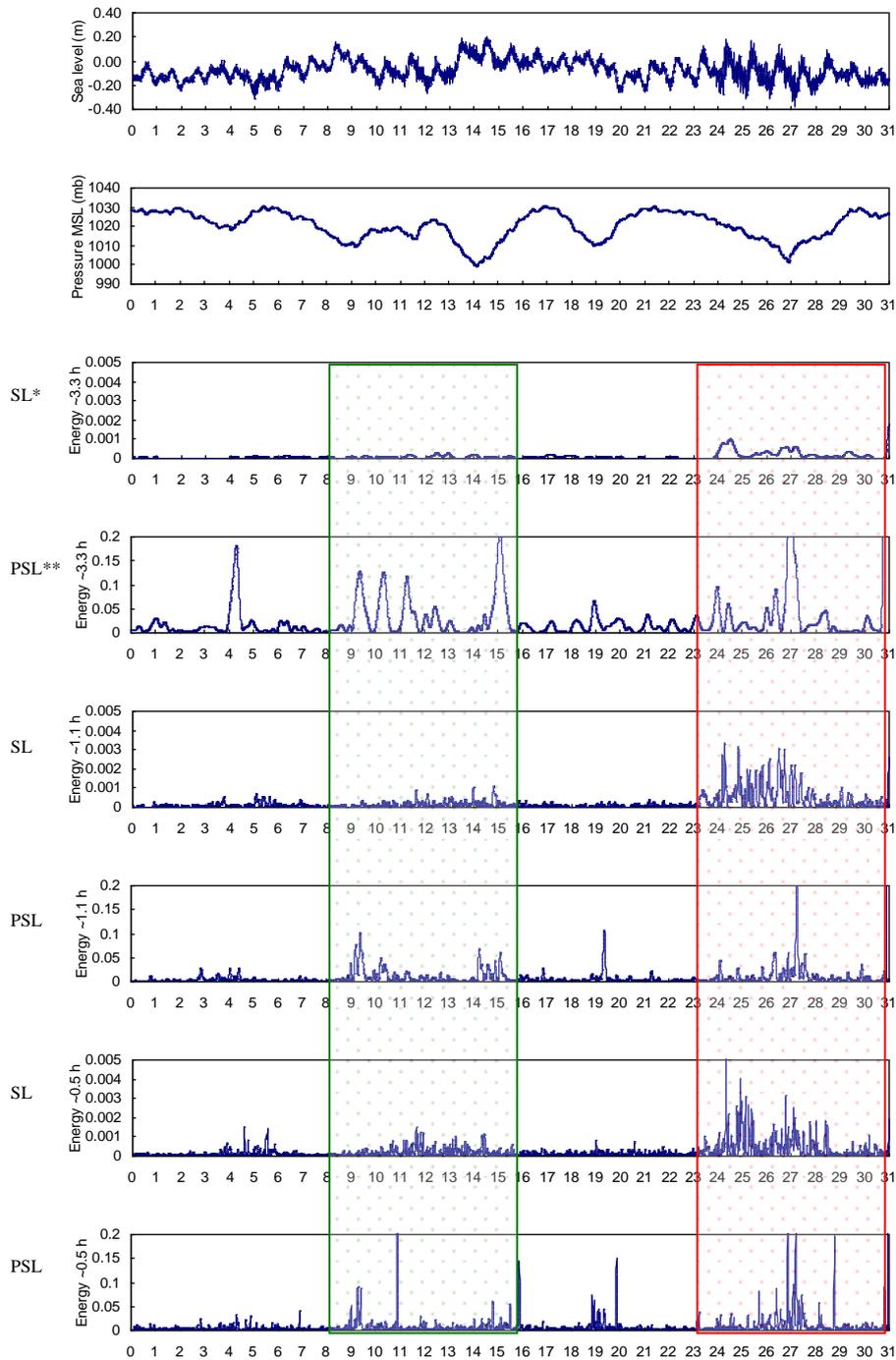
**Figura 7.9** Variación temporal de la energía en los modos resonantes durante **DICIEMBRE** de 1999 en Alfacs. Nivel del mar (SL) y presión atmosférica (PSL)



**Figura 7.10** Variación temporal de la energía en los modos resonantes durante MAYO de 1999 en Fangar. Nivel del mar (SL) y presión atmosférica (PSL)



**Figura 7.11 Variación temporal de la energía en los modos resonantes durante AGOSTO de 1999 en Fangar. Nivel del mar (SL) y presión atmosférica (PSL)**

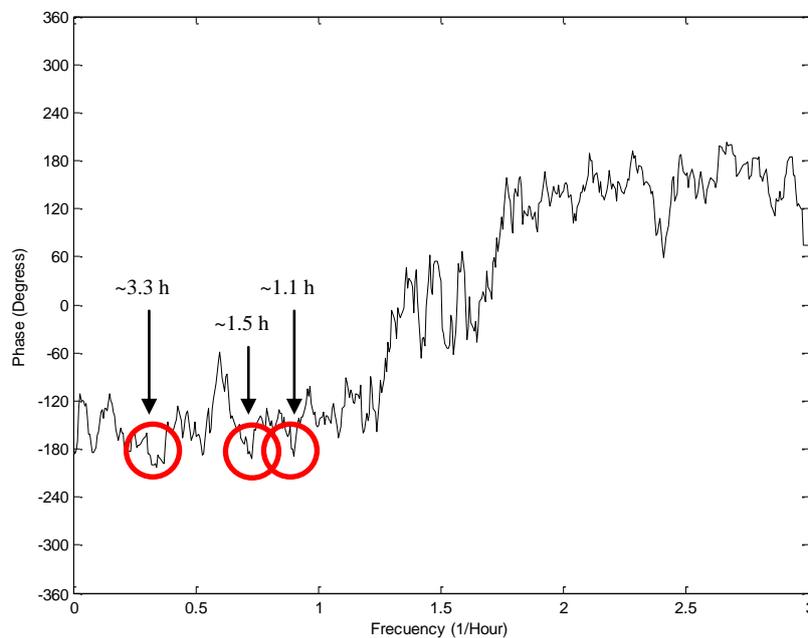


**Figura 7.12 Variación temporal de la energía en los modos resonantes durante DICIEMBRE de 1999 en Fangar. Nivel del mar (SL) y presión atmosférica (PSL)**

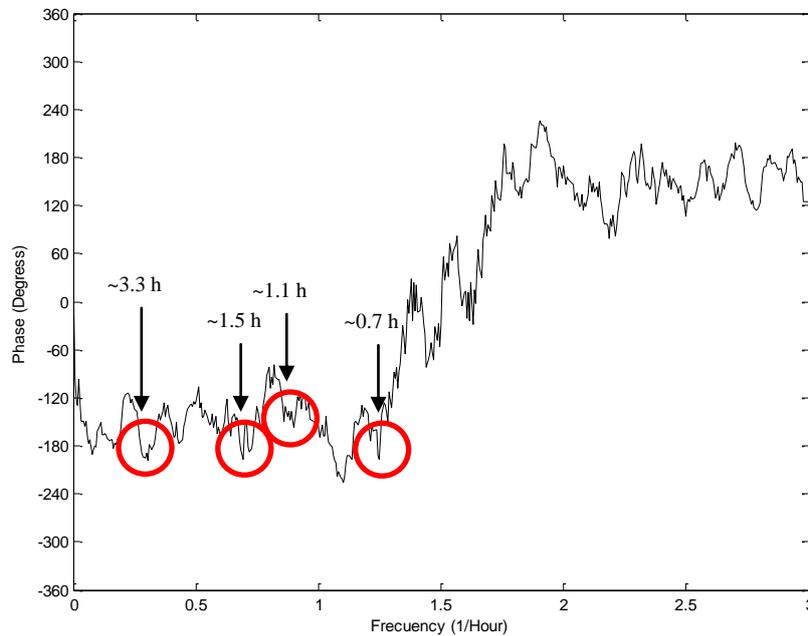
## 7.7 Análisis de las diferencias de fase entre la presión atmosférica y el nivel del mar en Alfacs y Fangar

De acuerdo con lo explicado en el apartado 7.2, si la relación entre las fases de ambas señales, presión atmosférica y nivel del mar, es igual a  $-\pi/2$ , la amplitud generada por la primera es máxima en un fenómeno de resonancia. La amplitud de ese fenómeno resonante es proporcional a  $\omega/\gamma$ . Asumiendo que  $\gamma \ll \omega$ , en la ecuación 7.6, la resonancia ocurre cuando  $\omega/k \approx (gH)^{1/2}$ .

Al construir los espectros de diferencias de fase de las series de presión atmosférica y nivel del mar en Alfacs y Fangar, tal como se muestra en las figuras siguientes, se concluye que en las frecuencias resonantes (entre  $F = 0$  y  $F = 1.5$ ) precisamente se observa que  $\psi = -\pi/2$  en clara concordancia con la teoría.



**Figura 7.13** Espectro de diferencias de fase entre las series de presión atmosférica y nivel del mar en Alfacs



**Figura 7.14 Espectro de diferencias de fase entre las series de presión atmosférica y nivel del mar en Fangar**

En los dos espectros de diferencias de fase hay algunas similitudes y algunas diferencias. La diferencia de fase,  $\psi$ , igual a  $-\pi/2$  ocurre justo donde se observan las frecuencias resonantes de 3.3 h y 1.5 h en ambos sitios, Alfacs y Fangar. Como se dijo, este valor implica las mayores amplitudes, observadas cuando hay resonancia. Las demás ondas muestran diferencias de fase ligeramente menor, lo que podría estar explicando la menor energía en estas frecuencias. Recuerdese que diferencias de fase cercanas a cero explican el “barómetro inverso”, lo que indica que la energía resonante disminuirá a medida que  $\psi$  se aproxima a este valor y se aleja de  $-\pi/2$ .

En todo caso, lo que están indicando estas figuras muy claramente es que existe una relación entre la presión atmosférica y la amplificación resonante de ondas largas en Alfacs y Fangar.

## 7.8 Conclusiones

De estos resultados se pueden obtener las siguientes conclusiones:

La coherencia entre las señales de presión atmosférica y nivel del mar es muy alta en las frecuencias resonantes de Alfacs y Fangar. Esto se concluye fácilmente a partir de una observación visual de los espectros de Fourier de ambos sitios y de las dos señales y se corrobora a partir del análisis de los espectros de coherencia de señales.

En la mayor parte de los eventos analizados existe una simultaneidad en las ondas de presión de 3.3 h, 1.1 h y 0.5 h, tanto en Alfacs como en Fangar. El fenómeno meteorológico que genera estas frecuencias parece ser el mismo. En ambos registros se observa una coincidencia entre estas ondas de presión atmosférica y las ondas de nivel del mar con igual período. Este comportamiento se aprecia más claramente cuando los episodios son más esporádicos (Julio, agosto y septiembre) y muchísimo más marcado en las frecuencias de 1.1 h y 0.5 h. No obstante la coincidencia temporal la mayoría del tiempo, se pueden matizar un par de aspectos: 1) Hay momentos en los que la presencia de ondas de presión atmosférica en las frecuencias analizadas con bastante energía no genera respuesta resonante en las bahías. Nótese esto, por ejemplo, los días 12-13 de mayo en Alfacs, 20-24 de mayo en Fangar, 9-11 de agosto en Alfacs y 22-23 de agosto en Fangar. 2) Hay otros momentos en los que, existiendo un pulso de la onda de presión atmosférica, la onda de nivel del mar parece tardar más en generarse. Véase, por ejemplo, del 9 al 18 de diciembre en Alfacs.

Debe existir algún fenómeno que explique que la onda de 3.3 h de nivel del mar no siempre muestre una relación clara con la onda de igual período de presión atmosférica, aún sabiendo que se observa una coincidencia temporal entre esta última y las frecuencias de 1.1 h y 0.5 h en los registros de nivel del mar y presión atmosférica en Fangar y, particularmente, en Alfacs. Esto podría ser explicado si existiera algún fenómeno exterior, de carácter regional, que explique estos casos.

Los espectros de diferencias de fase están indicando una relación entre la presión atmosférica y el nivel del mar en Alfacs y Fangar en las frecuencias donde se observa una amplificación resonante, en clara concordancia con el análisis teórico realizado.

# **8. ANÁLISIS DE LOS POSIBLES MECANISMOS FORZADORES: PRESIÓN ATMOSFÉRICA. ANÁLISIS ESPACIAL**

## **8.1 Introducción**

De acuerdo con las conclusiones del capítulo anterior, parece ser que existen evidencias suficientes de que la presión atmosférica es el mecanismo forzador (o al menos uno de los mecanismos forzadores) de las ondas observadas en las frecuencias de 3.3 h, 1.1 h y 0.5 h en los registros de nivel del mar en Alfacs y Fangar. En ese capítulo se hizo un análisis de las series de tiempo en los registros de presión atmosférica y nivel del mar en los dos sitios de registro de estas variables.

Sin embargo, las limitaciones del estudio del clima mediante el uso de fuentes únicamente analíticas, relacionado con la estadística de las series de tiempo son muy grandes. Entre ellas se encuentran: la pérdida de contacto con la realidad al no tener presente la interconexión con los distintos elementos del clima, la imposibilidad de descubrir la causa primaria de los fenómenos y la incapacidad del método, por su naturaleza estática, de sustituir el dinamismo del clima. Por ello es necesario complementar el análisis mediante el uso de fuentes sinópticas y/o dinámicas.

Las fuentes sinópticas hacen referencia a los mapas meteorológicos de escala regional que describen la situación atmosférica en un momento concreto. Estos están formados por los mapas de superficie, donde se representa la presión en la superficie y la localización de las zonas de alta y baja presión, junto con la posición de los frentes de masas. Se tienen también las topografías climáticas, mapas de altitud donde se representa de forma topográfica el relieve que tiene la superficie de una presión determinada; hay topografías climáticas de 850, 700, 500, 300 hPa. Estos mapas describen la situación sinóptica de una región. Precisamente el término *sinóptico* procede de la raíz griega *sinopsis*, que significa *visión general o comprensiva* (Martín-Vide y Olcina, 1996).

Con el objeto de complementar el análisis de las series de tiempo, en el presente Capítulo se buscan más argumentos en un análisis espacial de la presión atmosférica en superficie, haciendo uso de una base de datos de reanálisis de alta resolución (30 km), basada en un “downscaling” dinámico atmosférico denominado SEAWIND-NCEP, forzado a su vez por el reanálisis global NCEP/NCAR (Menéndez et al., 2011). Dicho análisis espacial parte del hecho de que precisamente el fortalecimiento o debilitamiento del dipolo que controla la variabilidad del clima del mar Balear (WeMOi) está directamente relacionado con el fortalecimiento o debilitamiento de los centros de acción que lo modulan y que fueron mostrados esquemáticamente en la Figura 7.1.

Posteriormente se analizan evidencias de la dirección de la onda de presión y se compara ésta con la evolución temporal de la energía de nivel del mar en las frecuencias resonantes para dichos eventos específicos.

## **8.2 Descripción de los datos**

Como se ha dicho, se ha hecho un análisis temporal y un análisis espacial de la presión atmosférica en la zona de estudio. Cada uno de estos dos análisis se ha basado en diferentes tipos de datos. El análisis temporal de la presión atmosférica se hizo en el capítulo anterior. En virtud de los resultados obtenidos, altamente coincidentes entre las series de nivel del mar y presión atmosférica en las frecuencias resonantes, en este capítulo se hace un análisis espacial de los campos de presión atmosférica.

Con el fin de evaluar la influencia de la presión atmosférica en la generación de las ondas resonantes observadas en las bahías de Alfacs y Fangar, se han usado los valores medios diarios del reanálisis de presión atmosférica en superficie de SEAWIND-NCEP, entre 1948 y 2009, y cuya resolución espacial es de 0.5°, para construir los estados de tiempo atmosférico en la zona del Mediterráneo occidental. Se ha analizado particularmente los datos del año 1999, coincidente con los registros utilizados de los mareógrafos de las bahías de Alfacs y Fangar.

## **8.3 Modelo meteorológico conceptual utilizado para explicar la generación de *seiches* en la costa catalana**

Como ya se ha mencionado, varios autores han propuesto la hipótesis de que las *seiches* en la costa catalana se deben a ciertas condiciones meteorológicas, principalmente a variaciones de presión atmosférica inducidas por trenes de ondas gravitatorias atmosféricas. Fontseré (1934) apuntaba a las variaciones de presión como causa última de las oscilaciones de las aguas del puerto de Barcelona. Señala, además, una mayor ocurrencia del fenómeno durante los meses de junio, julio y agosto. Ramis y Jansá (1983) proponen un modelo de situación

meteorológica a escala sinóptica propicia para la generación de *rissagues* en las costas baleares. Citando textualmente:

“La estructura a escala sinóptica:

*a) En superficie: Circulación ciclónica poco acentuada sobre el Mediterráneo occidental, con mínimo barométrico sobre la península ibérica. Altas presiones sobre Italia y Centroeuropa, mientras que en Baleares el flujo es del Este o Sureste flojo.*

*b) En niveles bajos a 850 hPa: Circulación ciclónica sobre la península ibérica. Baroclinidad muy acentuada por la presencia de aire cálido sobre el Mediterráneo y aire frío sobre la península. Gradiente de temperatura sobre el Mediterráneo es prácticamente zonal, con un valor aproximado de 4°C/150 km. Flujo sobre Baleares del Sureste o del Sur.*

*c) En niveles medios a 500 hPa: Vaguada muy acentuada con eje sobre la mitad Oeste de la península Ibérica con aire frío e incluso gota fría sobre el golfo de Cádiz o la península. Flujo del Suroeste sobre el Mediterráneo occidental.*

*d) En niveles medios a 300 hPa: Vaguada en fase con la del nivel de 500 hPa. Flujo del Suroeste sobre el Mediterráneo occidental que alcanza valores de corriente de chorro sobre la costa levantina”.*

Estos autores plantean incluso una estructura de mesoescala que no se menciona en este trabajo por cuanto no guarda relación espacial con la zona de estudio (Las Islas Baleares distan del Delta del Ebro cerca de 180 km). Se ha mencionado, sin embargo, la estructura a escala sinóptica planteada por estos autores, aunque sea en una zona diferente a la de estudio, porque podría servir de indicio para la estructura a la misma escala que se está buscando para Alfacs y Fangar. Es más, Pernas (1992) corrobora estas hipótesis para los *seiches* de la costa catalana para eventos que ocurren entre 1970 y mediados de los noventa, con resultados más o menos satisfactorios (coincidencia en cerca de un 80% de los casos analizados).

Sin embargo, este modelo conceptual no es más que la descripción de las condiciones meteorológicas de los días en los que se observan *rissagues*. Entendiendo que el proceso que ocurre en la atmósfera es más complejo que el observado en un sólo nivel de la misma, por cuanto los efectos de cizalladura se notan en varios estratos de una misma capa (o incluso en

capas diferentes de la atmósfera), pero sabiendo que es una aproximación suficientemente válida por cuanto muestra los efectos en superficie que es lo que interesa en este trabajo, el análisis en esta tesis se ha basado en la presión atmosférica de superficie (SLP) y se ha obviado la estructura interna de la atmósfera.

## **8.4 Análisis espacial de la presión atmosférica en Alfacs y Fangar mediante técnicas de clasificación y selección de estados climáticos a partir de datos de reanálisis**

En el apartado anterior se hizo un análisis espacial del comportamiento de la presión atmosférica en superficie a partir de datos gráficos. Si bien esto puede resultar complementario al análisis temporal de un sitio dado presentado en el Capítulo 7, esa información también puede ser limitada, por cuanto tiene datos agregados y que se circunscriben al día de análisis. Con el objetivo de tener en cuenta información sobre el comportamiento espacial de esta variable, de tal forma que se tengan los datos brutos y que se vaya más allá del día en cuestión, se ha procedido a analizar la base de datos de presión atmosférica en superficie media diaria obtenida del reanálisis SEAWIND-NCEP, que considera datos diarios en el Mediterráneo desde 1948 hasta 2009. El problema con estas bases de datos radica en la gran cantidad de información que hace que el análisis sea complejo. Para ello existen técnicas y metodologías de análisis que permiten simplificar esta información.

Por lo tanto, si se quiere definir con detalle la relación existente entre algunas variables atmosféricas y otras variables oceanográficas es necesario poder ver representados, de manera gráfica y sintetizada, una gran cantidad de datos. Cada uno de esos conjuntos de datos se convierte en una dimensión a analizar. La aplicación de técnicas pertenecientes a la minería de datos y de algoritmos de selección a las bases de datos de variables atmosféricas y oceanográficas permite la extracción de la información básica de estos grandes volúmenes

de datos de alta dimensionalidad. Con estas metodologías se pretende obtener una definición multidimensional de cualquier variable geofísica mediante una serie reducida de estados representativos de todo el conjunto de datos disponible.

Diferentes técnicas han sido utilizadas para analizar datos de clima atmosférico y de clima marítimo. Una recopilación muy completa de esto se puede encontrar en Camus (2009). En ese trabajo de investigación, se consideraron las técnicas de clasificación K-Medias (*k-means*), las redes neuronales auto-organizativas (*self-organizing maps*, SOM) y los vectores de cuantización con mecanismo consciente (*vector quantization with conscience mechanism*, VQC). En cuanto a los algoritmos de selección, Camus (2009) consideró los métodos basados en disimilitudes (*dissimilarity-based methods*) y comparó todas estas técnicas con la metodología clásica de clasificación basada en métodos de rejilla (2D), cubo (3D) o hipercubo (>3D). La aplicación concreta de todo este análisis la llevó a cabo con los datos de clima marítimo de las costas españolas. Sin embargo, este mismo análisis puede hacerse para agrupar, en unos pocos estados de clima atmosférico, los campos de presión atmosférica y compararlos con los eventos de resonancia en las bahías de Alfacs y Fangar. A continuación se hace precisamente este tipo de evaluación.

#### ***8.4.1 Técnicas de clasificación y selección de datos. Técnica K-medias (K-means)***

Las técnicas de clasificación y selección de datos extraen cierto tipo de información de las bases de análisis mediante la selección, por parte del analista, y la detección posterior de un grupo reducido de datos que representa con alguna precisión la base de datos de partida. Es decir, define pocos estados que caracterizan, en gran medida, la muestra completa de datos. Los conceptos de ‘más próximo’ o ‘similitud/disimilitud’ son utilizados permanentemente en estas técnicas. De entre las posibles definiciones de estos conceptos, en esta tesis se adopta el mismo criterio de similitud definido por Camus (2009): distancia entre los datos en el dominio espacial de los mismos. Las técnicas de clasificación dividen el conjunto de datos en subconjuntos siguiendo un criterio de similitud, mientras que las técnicas de selección identifican un conjunto de elementos de la base original representativos de la diversidad de

los datos. Cada una de las técnicas explora el espacio de los datos pero con objetivos diferentes. Para esta tesis se ha trabajado con la técnica K-medias (*K-means*), la que menor error de cuantización ha producido en el análisis de Camus (2009). Es cierto que esta conclusión no es aplicable a cualquier conjunto de datos, pero es un indicio que permite seleccionarla entre las diferentes técnicas que existe. La descripción detallada de la misma, tomada de Camus (2009), es la siguiente:

La técnica de clasificación K-medias divide el conjunto de datos de partida en un determinado número de subconjuntos, definido cada uno de ellos por un prototipo, y formado cada uno de ellos por los datos para los cuales ese prototipo es el más cercano. Este tipo de técnicas se denominan particionales siendo el algoritmo de K-Medias una de las más utilizadas. Se establece el número de grupos deseado, se inicializan los prototipos (o centroides) y el algoritmo procede de forma iterativa moviendo estos centroides hasta minimizar la varianza total intra-grupos (Hastie et al., 2001). Esta varianza total intra-grupos significa que al final del proceso, la suma de distancias entre el prototipo y los datos de entrada correspondientes a cada prototipo es mínima.

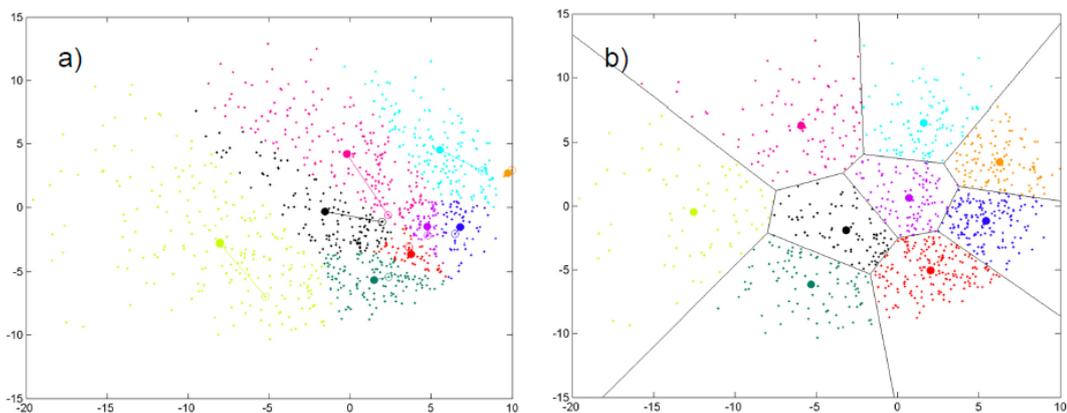
Por tanto, se dispone de una muestra de datos  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$  compuesta por  $N$  vectores  $n$ -dimensionales, donde  $N$  es el número total de datos a clasificar y  $n$  es la dimensión de los vectores de la base de entrada  $x_k = \{x_{1k}, x_{2k}, \dots, x_{nk}\}$ . El objetivo de la aplicación de la técnica de *K-Medias* es obtener un número  $M$  de subconjuntos o grupos definidos cada uno de ellos por un prototipo o centroide  $v_k = \{v_{1k}, v_{2k}, \dots, v_{nk}\}$  de la misma dimensión que los datos de partida, siendo  $k = 1, 2, \dots, M$ .

El proceso de clasificación consiste en un ajuste iterativo de los centroides que comienza con la selección aleatoria de los mismos,  $\{v_1^0, v_2^0, \dots, v_M^0\}$ , de entre los datos de partida (Peña et al. 1999). En cada ciclo, se identifican los datos de entrada más próximos a cada centroide y el nuevo centroide se redefine como la media de los vectores de entrada correspondientes a ese centroide. Por ejemplo, si en la iteración  $(r+1)$ , cada vector  $x_i$  es reasignado al grupo  $j$ , donde  $j = \min\{\|x_i - v_j\|, j = 1, 2, \dots, M\}$ , el centroide es actualizado según:

$$v_j^{r+1} = \sum_{x_i \in C_j} x_i / n_j \quad (8.1)$$

donde  $n_j$  es el número de vectores de entrada pertenecientes al grupo  $j$ . Después de varias iteraciones, el proceso converge cuando la pertenencia de los vectores a un grupo determinado se estabiliza.

En la figura siguiente se muestra la aplicación de la técnica de *K-Medias* a una muestra compuesta por  $N = 1000$  datos bidimensionales, con una cantidad de subconjuntos  $M = 9$ . En el panel izquierdo de la figura se muestran los centroides inicializados aleatoriamente marcados con círculos, mientras que los centroides actualizados después de esta primera iteración se han representado con puntos rellenos. Los centroides se redefinen como la media de los datos más próximos a cada centroide, que en esta figura se han representado en el mismo color que el correspondiente centroide. Este proceso de actualización se detiene hasta que la pertenencia a un determinado grupo queda fijada. En el panel derecho de la figura se muestran los centroides finales y los subconjuntos en los queda definido el espacio de los datos de partida. Se ha representado además la compartimentación de los grupos utilizando polígonos de Voronoi para facilitar la visualización de la clasificación realizada.



**Figura 8.1 Aplicación de K-Medias: a) Inicialización de los centroides (círculos) y definición de los mismos después de la primera iteración (puntos), b) Centroides y subconjuntos finales. Tomada de Camus (2009)**

## 8.4.2 Resultados

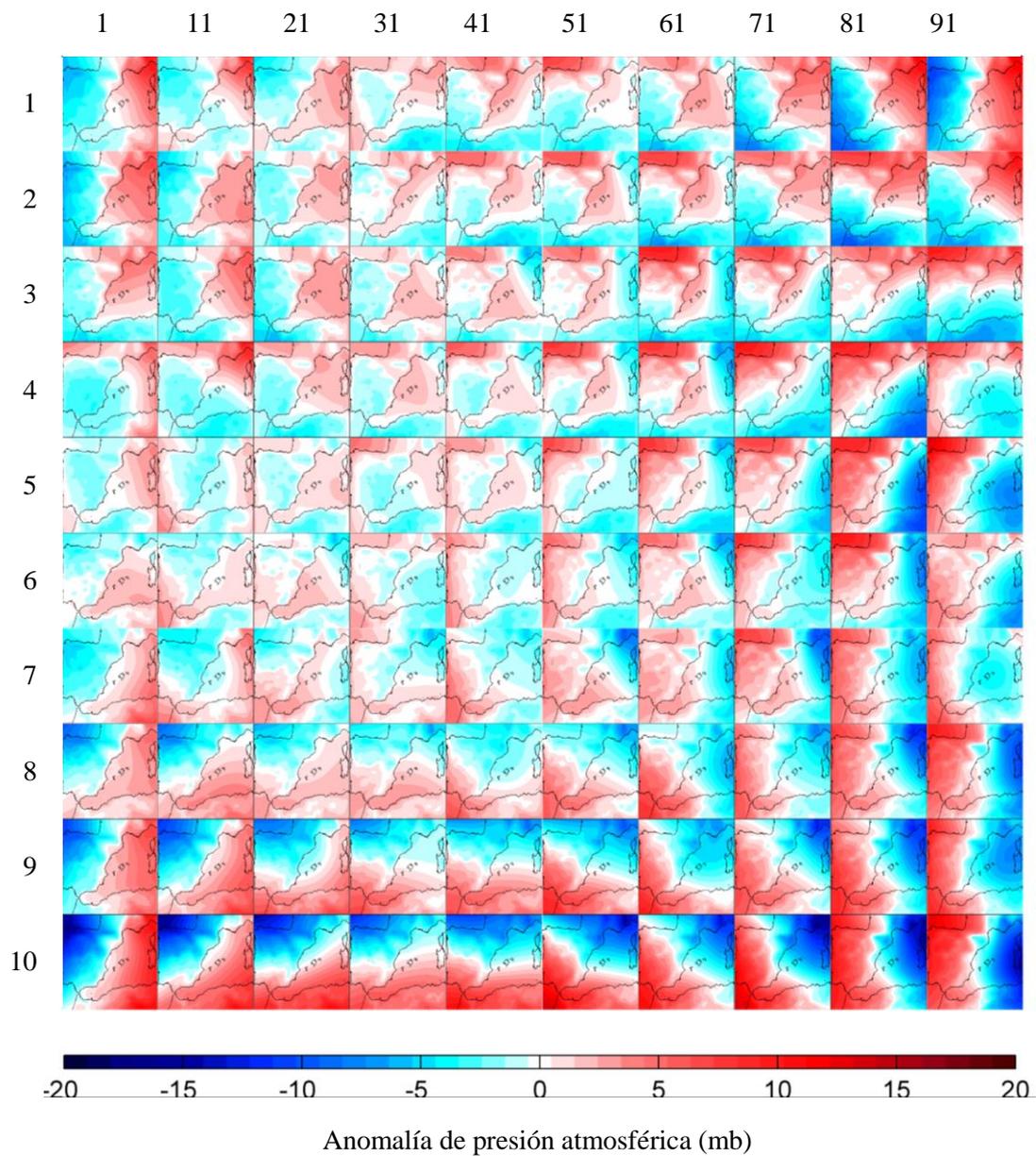
- **Estados de tiempo atmosférico**

Mediante la técnica de *K-medias* se ha hecho una clasificación de presión atmosférica en 100 estados que describen, en gran medida, las diferentes condiciones de esta variable sobre la península Ibérica y, particularmente, sobre el Mediterráneo occidental. Cada uno de estos estados se ha homogenizado por la media y se ha construido una gráfica que muestra las anomalías de presión en cada uno de ellos. Para esto se ha trabajado con los datos diarios de reanálisis de SEAWIND-NCEP entre 1948 y 2009. La siguiente figura (Figura 8.2) muestra los resultados obtenidos.

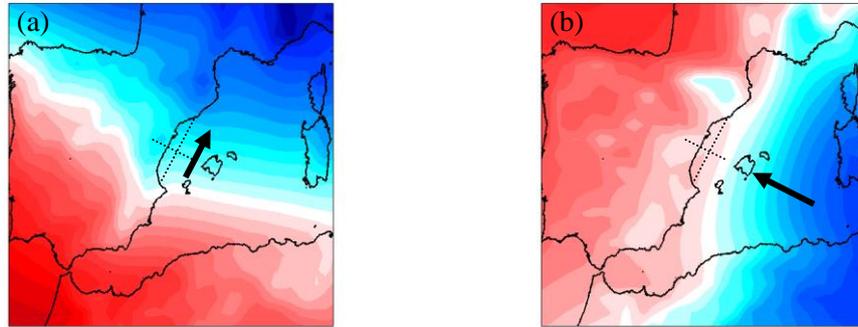
En esa figura puede apreciarse, además, que se han agrupado los estados atmosféricos de tal forma que los más alejados entre sí son los casos más diferentes; por el contrario, los más cercanos son los más que tienen anomalías de presión atmosférica más parecidas. Se ha dado una numeración a cada caso, de arriba hacia abajo y de izquierda a derecha, tal como se indica en la parte superior y al lado izquierdo de la figura.

Haciendo un análisis visual, es fácil distinguir que los gradientes de anomalías de presión atmosférica tienen una dirección principal, definida por la línea que une los puntos de más altas (rojo en la figura) y más bajas anomalías (azul en la figura), tal como se muestra esquemáticamente en la Figura 8.3.

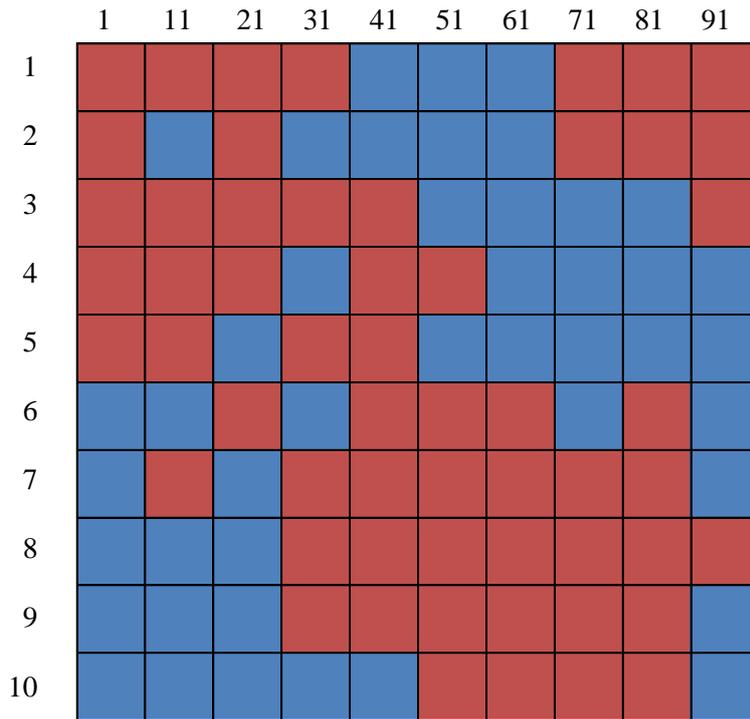
Si se hace el ejercicio de darle valor numérico a esa dirección, se obtiene una figura que clasifica los estados atmosféricos en función de la dirección principal del gradiente de anomalías de presión atmosférica, tal como se expresa en la Figura 8.4. Esa figura resume, mediante una escala de dos colores, la perpendicularidad de dicho gradiente con el eje de la plataforma continental (el color rojo en la figura indica gradiente de anomalía de presión atmosférica paralelo al eje de la plataforma continental y el color azul representa un gradiente perpendicular al mismo eje).



**Figura 8.2 Estados de anomalías de presión atmosférica sobre el Mediterráneo occidental clasificadas en 100 diferentes estados mediante la técnica de *K-medias***



**Figura 8.3** Esquema de dirección del gradiente de anomalía de presión atmosférica en el Mediterráneo occidental. (a) Gradiente paralelo a la línea de costa, (b) Gradiente perpendicular a la línea de costa



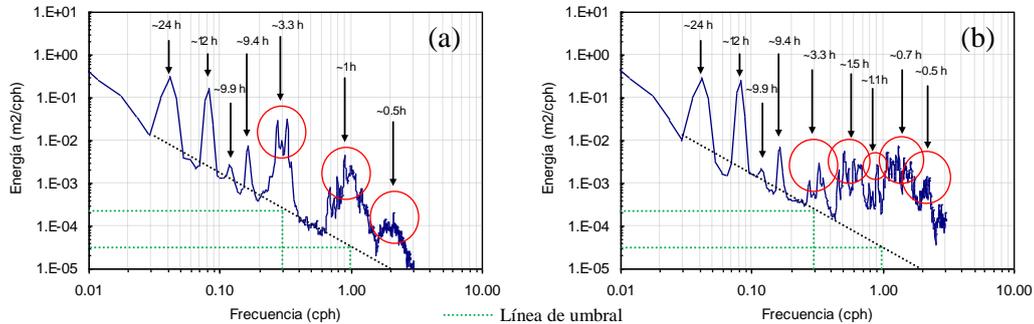
Nota: (Rojo: Gradiente paralelo a la línea de costa, Azul: Gradiente perpendicular a la línea de costa)

**Figura 8.4** Clasificación de los estados de anomalías de presión atmosférica sobre el Mediterráneo occidental mediante la dirección principal de su gradiente

• **Análisis a nivel diario de los eventos resonantes**

Como ya se ha dicho, los registros de los mareógrafos de Alfacs y Fangar están dados cada 10 minutos. Los estados de tiempo atmosférico se han construido a partir de una base de datos diaria. Para relacionarlos, es necesario agregar la información de nivel del mar a una escala temporal diaria y representarla gráficamente de la misma manera. El procedimiento para ello ha sido el siguiente:

- Con los espectros de Fourier de las series de nivel del mar en San Carles de la Ràpita (bahía de Alfacs) y l’Ampolla (bahía de Fangar), representados en las figuras 4.9 y 4.11, se definieron los umbrales a partir de los cuales se acepta como evento resonante un nivel del mar en cada una de las dos bahías. Obviamente, estos valores serán diferentes según la frecuencia analizada (3.3 h, 1.1 h y 0.5 h), pero iguales para ambas bahías. Presentando de nuevo estas figuras (por razones de escala no se muestra el umbral de la frecuencia 0.5 h), los valores se presentan en la Tabla 8.1.



**Figura 8.5 Umbrales resonantes en (a) San Carles de la Ràpita (bahía de Alfacs) y (b) l’Ampolla (bahía de Fangar). Datos de 1999**

**Tabla 8.1. Umbrales de resonancia**

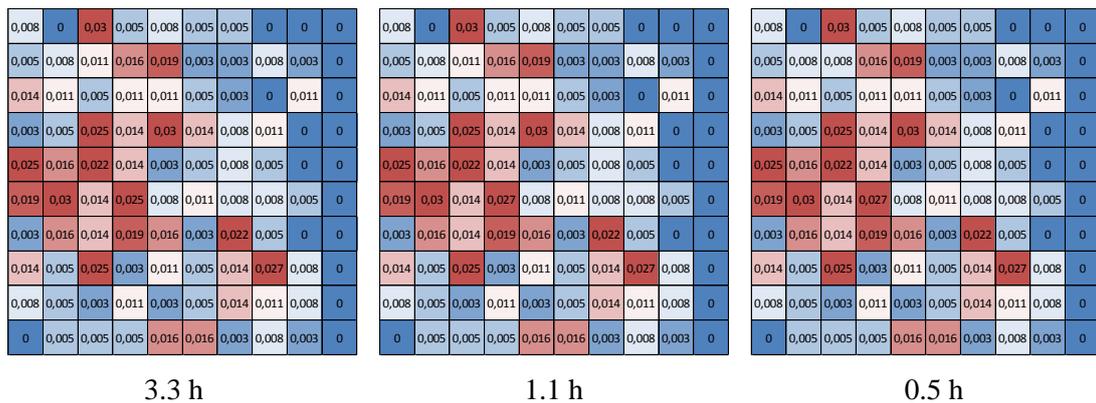
	<b>Frecuencia 3.3 h</b>	<b>Frecuencia 1.1 h</b>	<b>Frecuencia 0.5 h</b>
Umbral resonante (m2/cph)	$2 \times 10^{-4}$	$3 \times 10^{-5}$	$8 \times 10^{-6}$

Nota: Los valores del umbral resonante están dados en unidades de energía

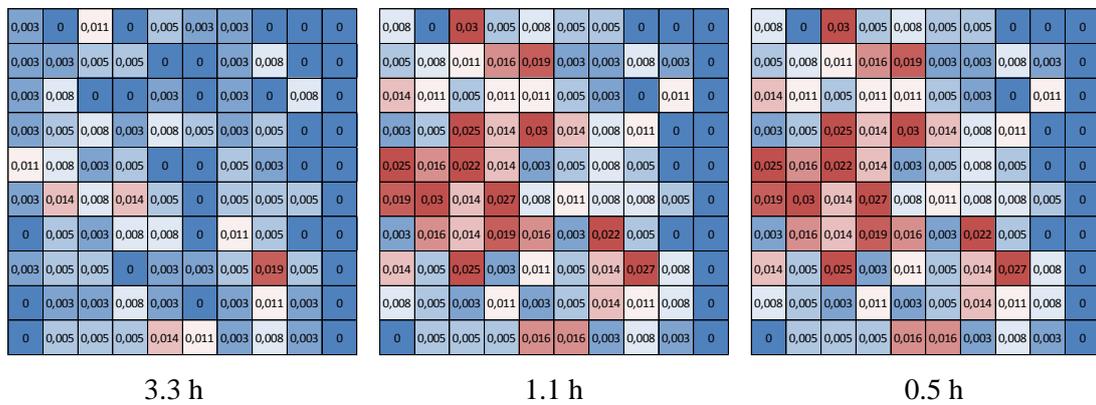
- Con estos umbrales se seleccionaron los registros del año 1999 en los que se presentó al menos un evento resonante, aquel que superó el umbral definido previamente. Esto se hizo para cada una de las series de energía de cada frecuencia analizada.

- Posteriormente se obtuvo la probabilidad de ocurrencia de cada evento resonante en cada uno de los estados de tiempo (o estado de anomalías de presión atmosférica) definidos en el apartado anterior.

Los resultados son los que se presentan en las figuras siguientes. Los valores indican dicha probabilidad. La escala de colores representa probabilidades de ocurrencia bajas (0%-0.5%) y las rojas probabilidades de ocurrencia más altas (1.5%-2.5%). La representación gráfica coincide con la de la Figura 8.2.



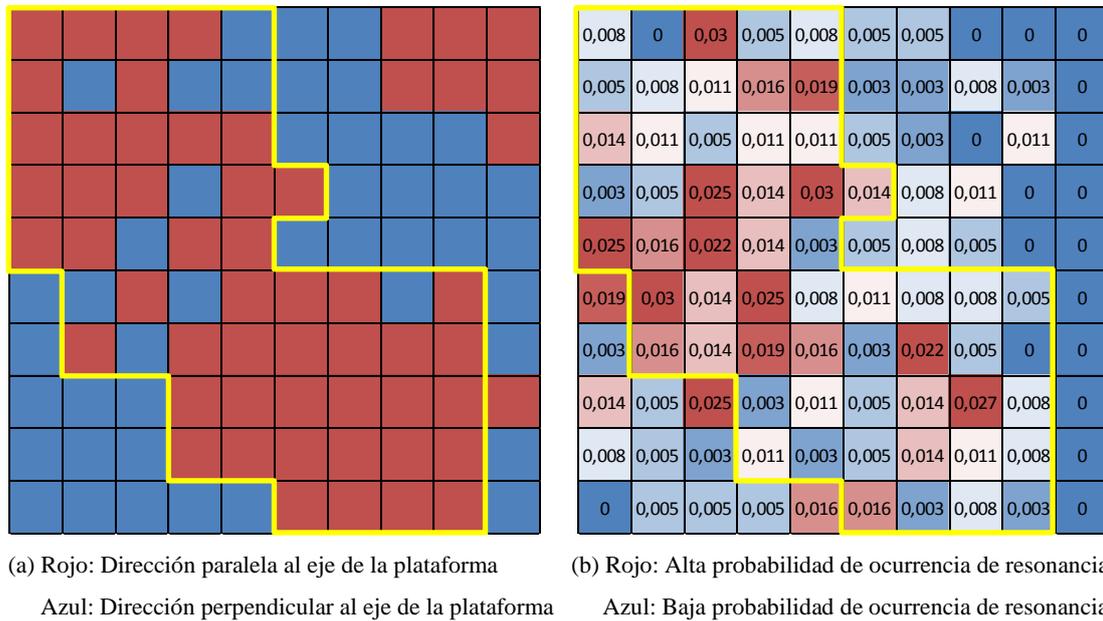
**Figura 8.6 Probabilidad de ocurrencia de eventos resonantes en cada estado de tiempo atmosférico. Bahía de Alfacs**



**Figura 8.7 Probabilidad de ocurrencia de eventos resonantes en cada estado de tiempo atmosférico. Bahía de Fangar**

En las figuras anteriores es notoria la similitud gráfica y numérica para las diferentes frecuencias y para ambas bahías. Las mayores probabilidades de ocurrencia están concentradas en una zona localizada en el centro-izquierda de la gráfica. Los valores son idénticos, incluso, en algunos casos. Sin embargo, y como se ha evidenciado a lo largo de este documento, la frecuencia resonante de 3.3 h en la bahía de Fangar no muestra señales tan fuertes como en la bahía de Alfacs o como las otras frecuencias resonantes. Esto ya se asoció, en el capítulo 5, a la geometría de la misma.

Por otro lado, comparando gráficamente las figuras 8.4, 8.6 y 8.7, parece evidente que se cumple la hipótesis mencionada en varios apartados del presente capítulo, en el sentido de que hay una relación entre la dirección del gradiente de anomalías de presión atmosférica y los eventos resonantes. La Figura 8.8 muestra esta comparación para el modo principal de oscilación en la bahía de Alfacs (3.3 h).



**Figura 8.8 Comparación gráfica entre (a) la dirección y (b) la probabilidad de ocurrencia de eventos resonantes, en los diferentes estados de tiempo atmosférico**

Claramente se observa en la gráfica anterior la correspondencia y similitud entre la zona de concentración de aquellos estados de tiempo atmosférico que muestran una dirección paralela al eje de la plataforma continental entre Valencia y Barcelona y la zona de concentración de alta probabilidad de ocurrencia de eventos resonantes en las bahías de Alfacs y Fangar. Esta zona se ha señalado con un contorno de color amarillo. Las diferencias por fuera de esta zona están más asociadas con la diferencia en la temporalidad de los datos con los que se construyeron los estados de tiempo atmosférico (diaria) y los registros diezminutales de nivel del mar en San Carles de la Ràpita (bahía de Alfacs) y l’Ampolla (bahía de Fangar).

Parece ser claro, entonces, que en los eventos de mayor energía en las tres frecuencias analizadas (3.3 h, 1.1 h y 0.5 h), la dirección de la onda de presión atmosférica es paralela a la plataforma continental de la zona analizada. Cuando el campo de presión atmosférica se desplaza de forma paralela a la línea de costa entre Valencia y Tarragona, esta energía es

mayor. Independientemente de la localización de los centros de presión, o de la magnitud de esta, un movimiento de las isobaras en dirección NE-SO ó SO-NE implican un evento resonante. Debido a que el cambio de dirección en la onda de presión puede tardar algunos días, la sobreamplificación en Alfacs y Fangar también ocurre durante ese lapso de tiempo.

El hecho de que haya una relación directa entre la dirección de la onda de presión y los eventos resonantes analizados ya es una conclusión importante. No obstante, llama poderosamente la atención que la dirección de la onda de presión que maximiza la magnitud de dichos eventos coincida con la orientación del eje longitudinal de la plataforma continental entre Valencia y Tarragona. Esto indica que la plataforma continental juega un papel importante en la resonancia de Alfacs y Fangar. Es decir, debe existir un mecanismo intermedio, de plataforma, entre el fenómeno meteorológico y el evento resonante. Si esto es así, el paralelismo entre la dirección de la onda de presión y la plataforma continental y, por ende, entre estos y la generación de la onda de plataforma, podría explicarse con un argumento puramente geométrico:

En el Capítulo 7 ya se había hablado del acoplamiento que podría existir entre una onda de presión y una onda resonante. Se había dicho que un desfase de  $-\pi/2$  y una igualdad en la celeridad de dichas ondas generan una amplificación teórica infinita de la superficie del mar. La concordancia en ambos parámetros necesariamente implica una similitud en las dimensiones de las dos ondas. A efectos de una explicación, sólo supongamos que la onda de presión atmosférica viaja perpendicularmente a la plataforma continental entre Valencia y Tarragona. Considerando que la profundidad media de dicha plataforma es  $h = 50$  m, la longitud de una onda de 3.3 h de período debe ser del orden de 270 km, mucho mayor que el ancho de 60 km de la misma. Por el contrario, esta longitud de onda coincide perfectamente con la longitud de la plataforma entre Valencia y Tarragona.

Por lo tanto, es imposible geoméricamente que una onda con el período de las observadas como resonantes en Alfacs y Fangar pueda desarrollarse si se genera perpendicularmente a la plataforma continental. En cambio, sí lo puede hacer, y con coincidencias perfectas, longitudinalmente a la misma.

- **Análisis diario de diferentes eventos resonantes**

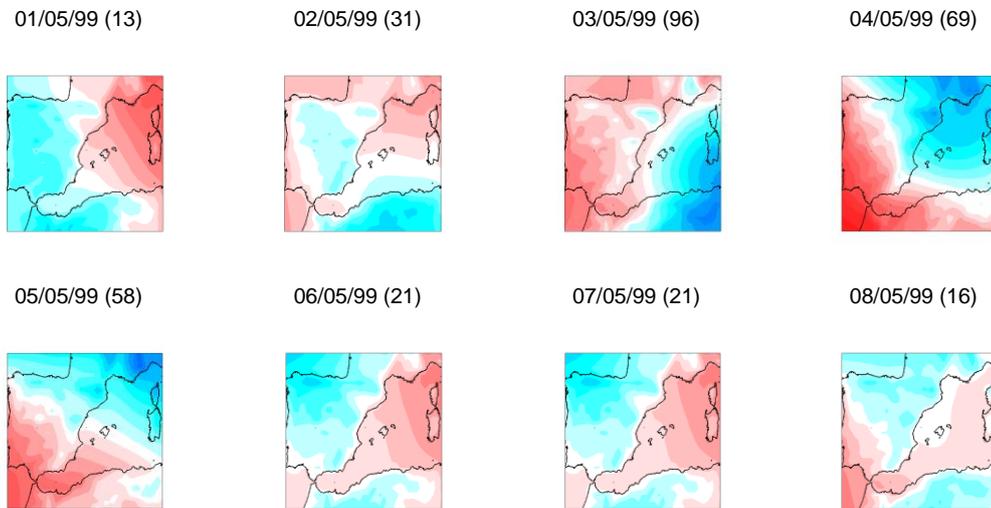
Según la clasificación realizada, puede hacerse una evaluación de los eventos descritos en la Tabla 8.2, de tal forma que cada día puede ser caracterizado por un estado atmosférico según la clasificación de estados realizada y presentada en la Figura 8.11. Es posible, entonces, comparar temporalmente lo que ocurre con la presión atmosférica y lo que registran los mareógrafos de San Carles de la Rápita (Alfacs) y l'Ampolla (Fangar). A continuación se presentan los resultados según los meses de análisis.

**Tabla 8.2. Eventos seleccionados para el análisis espacial de la presión atmosférica**

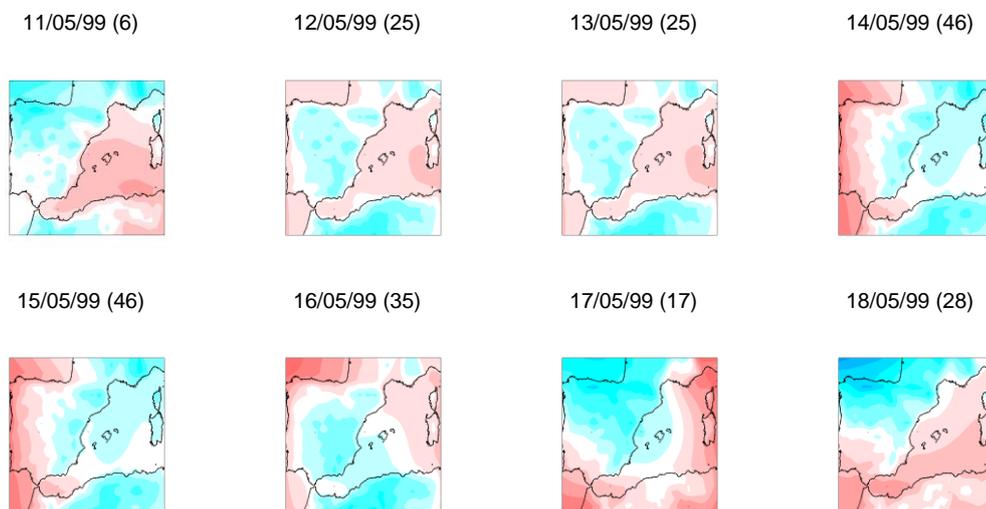
Evento	Fecha	Observaciones Alfacs	Observaciones Fangar
1	01/05/99 - 08/05/99	Resonancia en T=3.3 h y T=1.1 h Evidencias en 0.5 h	Resonancia en T=1.1 h y T=0.5 h Evidencias en 3.3 h
2	11/05/99 - 18/05/99	Resonancia en T=3.3 h y T=1.1 h Evidencias en 0.5 h	Resonancia en T=1.1 h y T=0.5 h Evidencias en 3.3 h
3	23/05/99 - 30/05/99	Resonancia en T=3.3 h y T=1.1 h Evidencias en 0.5 h	Resonancia en T=1.1 h y T=0.5 h
4	15/08/99 - 22/08/99	Resonancia en T=3.3 h y T=1.1 h Evidencias en 0.5 h	Resonancia en T=1.1 h y T=0.5 h
5	07/12/99 - 22/12/99	Resonancia en T=3.3 h	Evidencias en 1.1 h y 0.5 h
6	23/12/99 - 30/12/99	Resonancia en T=3.3 h y T=1.1 h Evidencias en 0.5 h	Resonancia en T=1.1 h y T=0.5 h Evidencias en 3.3 h

*- Análisis de los eventos resonantes del mes de mayo de 1999*

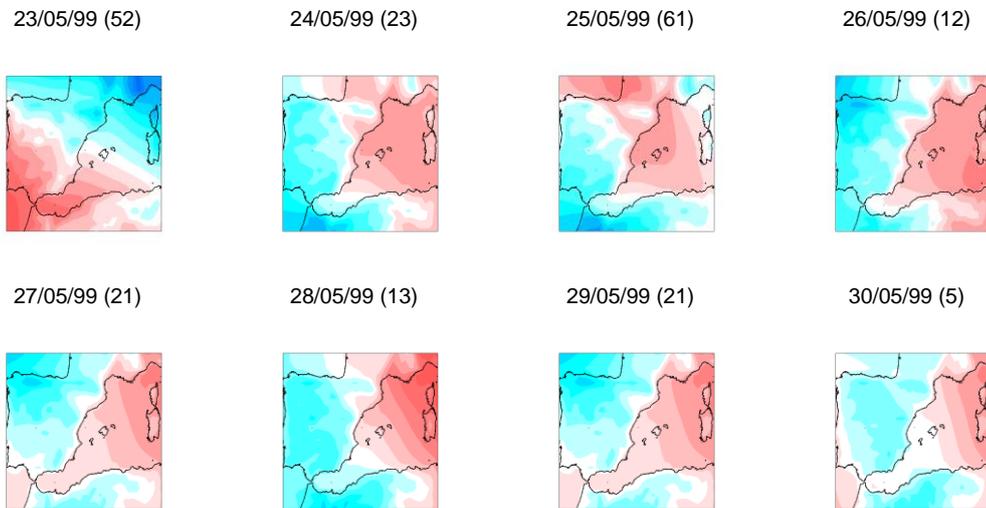
En las figuras siguientes se presenta la evolución temporal de los estados de presión atmosférica identificados según la técnica *K-media* durante los eventos del mes de mayo de 1999 (identificados como eventos 1, 2 y 3 según la tabla 8.1). Nótese que casi todos los días, los estados característicos de estos períodos corresponden a condiciones climáticas que muestran centros de altas anomalías de presión sobre la península Ibérica o sobre la península Itálica y centros de bajas anomalías de presión en la otra. Se confirma entonces que la localización de estos centros de presión no incide en los eventos resonantes.



**Figura 8.9 Evolución temporal de los estados de las anomalías de presión atmosférica sobre el Mediterráneo occidental durante el Evento 1 (01/05/99 - 08/05/99)**



**Figura 8.10 Evolución temporal de los estados de las anomalías de presión atmosférica sobre el Mediterráneo occidental durante el Evento 2 (11/05/99 - 18/05/99)**



**Figura 8.11 Evolución temporal de los estados de las anomalías de presión atmosférica sobre el Mediterráneo occidental durante el Evento 3 (23/05/99 - 30/05/99)**

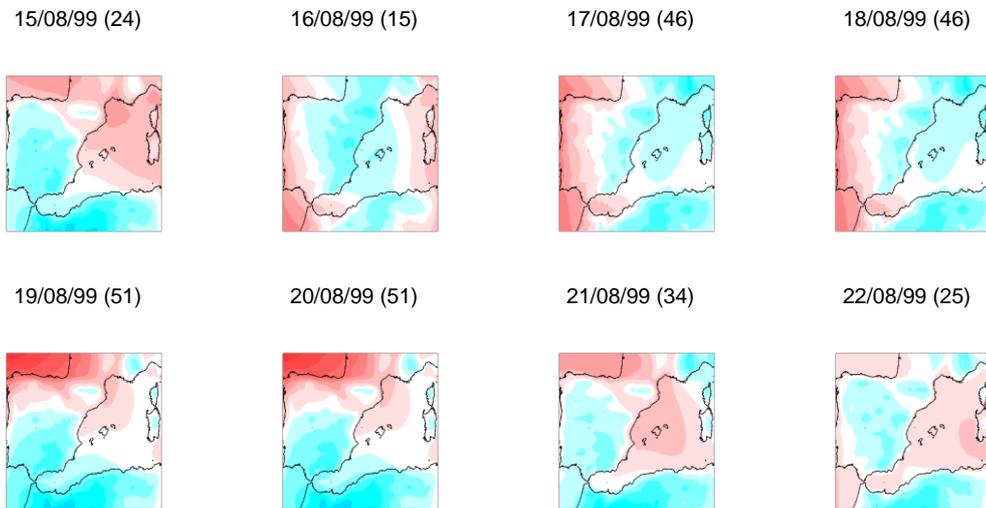
Lo que sí parece ser evidente, también con este análisis, es la dirección paralela al eje de la plataforma valenciano-catalana de la línea que une los centros de altas y bajas anomalías de presión atmosférica, independientemente donde se encuentren, Italia o España, coincidiendo con las conclusiones obtenidas anteriormente.

Se nota también que hay algunos pocos días que esta conclusión no se cumple. El hecho de que esto ocurra apenas por un día, en medio de un período prolongado de varios en los que sí lo hace, indica que la onda generada en la plataforma continental puede estar actuando sin haberse disipado, de tal manera que cuando los centros de altas y bajas anomalías de presión se ubican sobre España e Italia, independientemente de dónde esté el uno o el otro, esta situación vuelve a excitar la masa de agua contenida en la plataforma valenciano-catalana y se genera de nuevo la resonancia en las bahías de Alfacs y Fangar.

*- Análisis de los eventos resonantes del mes de agosto de 1999*

La figura siguiente muestra la evolución temporal de las anomalías de presión clasificadas en el evento registrado durante el mes de agosto de 1999.

---



**Figura 8.12 Evolución temporal de los estados de las anomalías de presión atmosférica sobre el Mediterráneo occidental durante el Evento 4 (15/08/99 - 22/08/99)**

En la gráfica anterior no parece ser tan evidente que los registros de amplificación resonante en Alfacs y Fangar coincidan con la localización de los centros de altas y bajas anomalías de presión atmosférica en cualquiera de las dos penínsulas, Ibérica e Itálica, sobre todo en los extremos del período analizado. Si se compara esto con los datos presentados en las figuras 8.5 y 8.8, en las que se muestra respectivamente la evolución temporal de la energía en las frecuencias resonantes en Alfacs y Fangar, la conclusión es la misma: hay eventos especialmente resonantes entre los días 16 y 20 de agosto de 1999, justo cuando los centros de presión se encuentran en España e Italia. Por el contrario, no hay eventos resonantes en los primeros y últimos días (15, 21 y 22 de agosto).

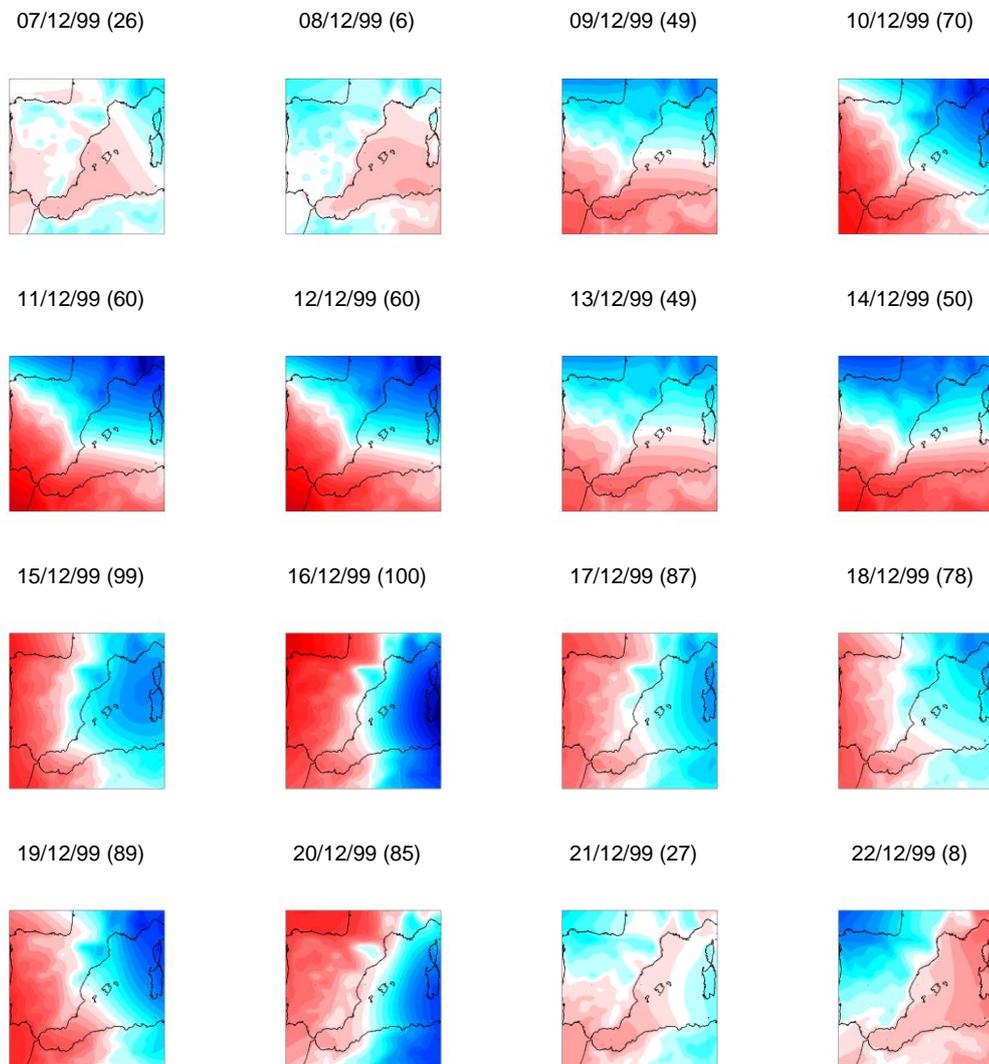
*- Análisis de los eventos resonantes del mes de diciembre de 1999*

El evento resonante del período comprendido entre el 15 y el 30 de diciembre de 1999 es quizás, de todos los analizados, el de mayor duración y mayor energía en todas las frecuencias resonantes de las bahías de Alfacs y Fangar. Las figuras 4.15 y 4.19 corroboran claramente esa afirmación. Por eso es especialmente importante su análisis.

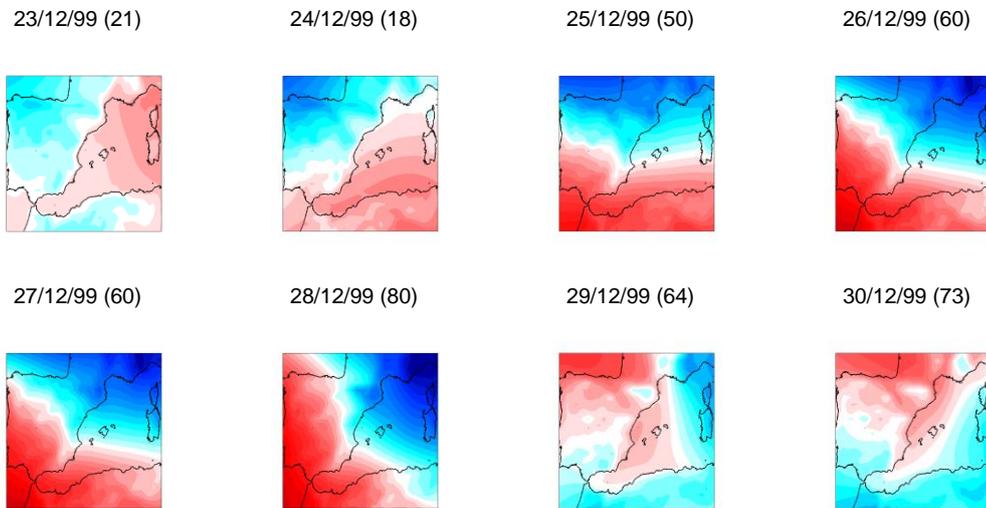
Las figuras siguientes muestran, día a día, el estado de presión atmosférica según la clasificación de estados hecha con la técnica *K-medias* durante los eventos 5 (07/12/99 – 22/12/99) y 6 (23/12/99 – 30/12/99).

En ella se observan muy claramente dos cosas:

- 1) Unas mayores anomalías de presión atmosférica, determinadas por la mayor intensidad de los colores en las gráficas.
- 2) La práctica totalidad del tiempo en el que la línea imaginaria de conexión entre los centros de altas y bajas anomalías de presión coincide con el eje longitudinal de la plataforma continental entre Valencia y Tarragona. Los únicos días en los que esto no ocurre, del 19 al 22 y del 29 al 30 de diciembre, coincide con un tiempo de mínima energía en las frecuencias resonantes de Alfacs y Fangar (Figuras 8.6 y 8.9).



**Figura 8.13 Evolución temporal de los estados de las anomalías de presión atmosférica sobre el Mediterráneo occidental durante el Evento 5 (07/12/99 - 22/12/99)**



**Figura 8.14 Evolución temporal de los estados de las anomalías de presión atmosférica sobre el Mediterráneo occidental durante el Evento 6 (23/12/99 - 30/12/99)**

## 8.5 Conclusiones

De los resultados obtenidos en este Capítulo se puede concluir que la relación entre la resonancia en las bahías de análisis (Alfacs y Fangar) y el WeMOi está descartada totalmente, por cuanto la localización de los centros de presión no está vinculada directamente a la magnitud de los eventos observados.

En cambio, se ha terminado de demostrar que la presión atmosférica influye en los eventos resonantes de Alfacs y Fangar. En particular, la dirección de la onda de presión atmosférica está directamente relacionada con los eventos más energéticos. Cuando el campo de presión atmosférica se desplaza de forma paralela al eje de la plataforma continental entre Valencia y Barcelona, esta energía es mayor. Por el contrario, cuando esta dirección es perpendicular al

eje de dicha plataforma, se generan los menores niveles de energía en los registros de nivel del mar de San Carles de la Rápita y l'Ampolla en las frecuencias resonantes.

En cualquier caso, parece existir un mecanismo intermedio, de plataforma, que vincule los campos de presión atmosférica con los eventos resonantes en Alfacs y Fangar.

# **9. ANÁLISIS DE LOS POSIBLES MECANISMOS FORZADORES: ONDAS DE BORDE**

## **9.1 Introducción**

Ya se ha demostrado, mediante diferentes metodologías y herramientas, que las bahías de Alfacs y Fangar, en el delta del Ebro, resuenan en ~3.3 h, ~1.1 h y ~0.5 h. La naturaleza periódica del fenómeno permite concluir que los tsunamis, eventos esporádicos, no pueden ser la causa de esa resonancia. En el Capítulo 5 se mostró que era improbable que el viento fuera el mecanismo generador. Posteriormente se comprobó que ondas de ciertas características de presión atmosférica podrían ser la causa fundamental de esas amplificaciones resonantes. No obstante, se planteó también la posibilidad de que esas frecuencias existieran más allá de la localidad inicialmente analizada. La coincidencia temporal de las ondas tanto en Alfacs como en Fangar hace sospechar ese carácter regional,

lo que implicaría necesariamente la existencia un mecanismo intermedio entre los pulsos de presión atmosférica y las ondas resonantes dentro de las bahías. Con el objeto de intentar establecer esta relación, se ha analizado mediante modelación numérica lineal y análisis de datos la existencia de ondas de borde en la plataforma continental entre Valencia y Barcelona. A continuación se presentan estos análisis.

## **9.2 Relación entre ondas de borde y la amplificación resonante en Alfacs y Fangar**

La existencia de ondas de talud atrapadas contra la costa fueron observadas y registradas por primera vez por Snodgrass *et al.* (1962) en algunos espectros anómalos de nivel del mar de las costas de California. Si bien estos autores lograron reproducir correctamente los espectros que no habían podido explicar hasta ese momento, justificando teóricamente dichas ondas, no se preocuparon por buscar las explicaciones de las causas de las mismas. En cambio, Buchwald and de Szoeke (1973), a partir del mismo modelo, sí establecieron las condiciones bajo las cuales se produciría un acoplamiento entre un pulso de presión atmosférica y una onda de plataforma. Shillington (1984) logró explicar que las ondas observadas por él en Sudáfrica eran ondas de talud forzadas por un pulso de presión atmosférica. Como estas, hay otras evidencias sobre este tipo de relación entre atmósfera y océano (Merrifield *et al.*, 2002).

Sin embargo, la amplificación resonante de las ondas de plataforma en bahías naturales y, por ende, la relación indirecta entre ondas de presión atmosférica y *seiches*, que implica un mecanismo intermedio (como las ondas de plataforma) que conecte los dos fenómenos, parece no ser un caso generalizado de estudio. Tal parece que esta situación no es muy común en la naturaleza o todavía no se ha sospechado de la relación en los casos existentes. En el Mediterráneo, como posible explicación de la causa de las *rissagues* observadas en Ciutadella, Menorca, se ha establecido desde hace años esta relación (Tintoré *et al.*, 1988; Liu, 2002).

Una mirada rápida a las formulaciones analíticas permite inducir que la plataforma continental en el tramo comprendido entre el golfo de Valencia y Barcelona tiene períodos propios de oscilación que coinciden con los modos resonantes en Alfacs y Fangar (Yanomi y Tsuji, 1998):

$$\omega^2 = \frac{(2v+1)(2m+1)\pi\alpha g}{2L} \quad (9.1)$$

- Donde:
- $\omega$  es la frecuencia angular
  - $v$  es el modo transversal de la onda
  - $m$  es el modo longitudinal de la onda
  - $\alpha$  es la pendiente transversal de la plataforma
  - $g$  es la aceleración de la gravedad
  - $L$  es la longitud de la plataforma

Reemplazando  $L = 230$  km y  $\alpha = 150$  m/40 km, los valores de la plataforma entre Valencia y Tarragona, se obtienen los resultados que se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla 9.1. Modos propios de oscilación de la plataforma Valencia-Barcelona**

$v$	$m$	<b>T (s)</b>	<b>T (h)</b>
0	0	12,535	3.48
1	1	4,178	1.16
2	2	2,507	0.70

Estos valores coinciden perfectamente con los períodos resonantes observados en San Carles de la Ràpita y l’Ampolla (Ver Capítulo 4), lo que parece no ser una pura coincidencia.

Por otro lado, las ondas de borde son atrapadas si la velocidad de fase,  $c$ , está en el rango (Buchwald and de Szoeko, 1973):

$$(gh_1)^{1/2} \leq c \leq (gh_2)^{1/2} \quad (9.2)$$

Se ha considerado la profundidad de la plataforma continental como  $h_1$  y la del océano como  $h_2$ . Si  $h_1 = 50$  m y  $h_2 = 1500$  m en la plataforma continental entre Valencia y Tarragona la velocidad de fase de las ondas de borde debe estar entre 30 m/s y 120 m/s. Si se ha dicho ya que existe una relación entre la onda de presión atmosférica y la onda de nivel del mar en los períodos de interés en Alfacs y Fangar, debería también existir una relación directa entre la velocidad de las dos ondas. Si la onda de presión viaja a menor velocidad, el volumen de agua sobre el que se propaga alcanza a “amortiguar” el movimiento. Por el contrario, si la velocidad de dicha onda es mayor, la superficie del agua no “siente” el paso de la onda. Existirá un valor de la velocidad de la onda de presión atmosférica a la cual se haga máxima la amplificación del nivel del mar. En el capítulo siguiente se tratará este tema con más detalle.

### **9.3 Ondas de borde como mecanismo intermedio entre la perturbación atmosférica y la resonancia en Alfacs y Fangar. Hipótesis**

La hipótesis de que ondas de borde son un mecanismo intermedio entre el pulso de presión atmosférica y la resonancia en Alfacs y Fangar puede ser resumida fácilmente: La perturbación atmosférica produce oscilaciones en la superficie del mar de diversos períodos superpuestos por fuera de las bahías. Estas, a su vez, generan *seiches* forzadas o amplificaciones resonantes dentro de las bahías cuando los períodos coinciden con ciertas características geométricas de las mismas. Esta hipótesis implica necesariamente que existan ondas en plataforma generadas por las perturbaciones de presión atmosférica, que conecten la ocurrencia de los dos fenómenos. Estas ondas de plataforma son, en nuestro caso, ondas

---

de borde con períodos que coinciden, a su vez, con los modos propios de oscilación de la plataforma y de las bahías.

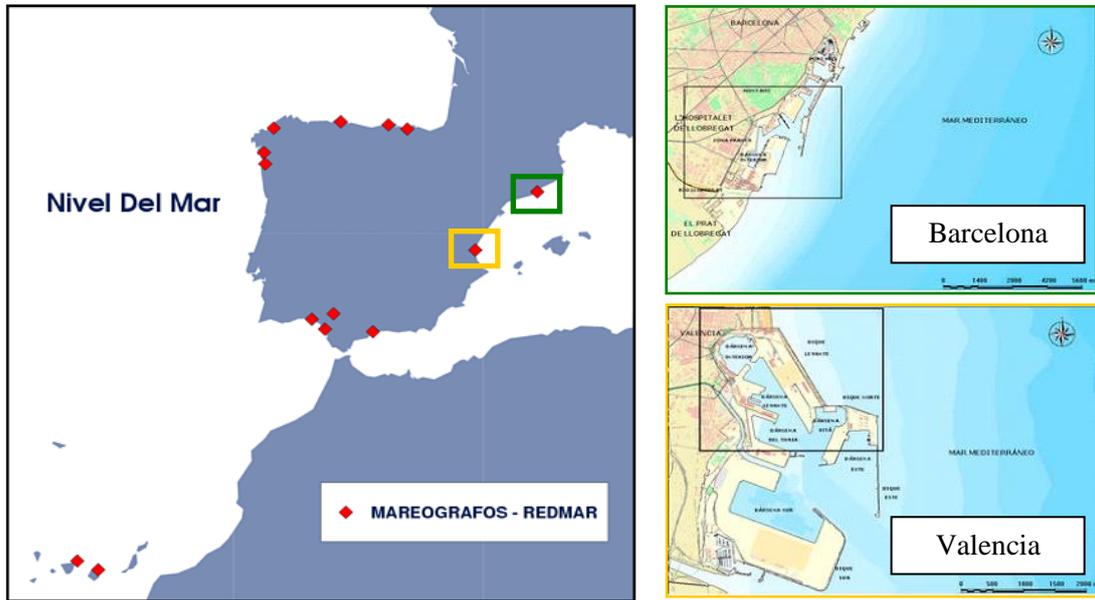
En los apartados siguientes se intentará demostrar, mediante análisis de datos y modelación numérica, la evidencia de ondas de borde (con similitud de períodos con las ondas resonantes de Alfacs y Fangar) en la plataforma comprendida entre el golfo de Valencia y Barcelona, de tal forma que se pueda articular la hipótesis planteada.

## 9.4 Descripción de los datos

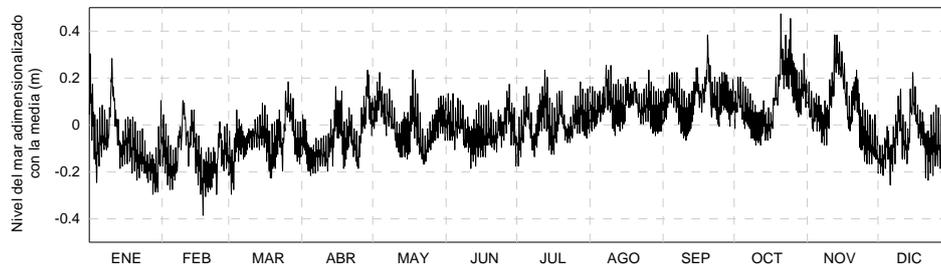
Para corroborar el análisis a nivel regional y buscar los mecanismos forzadores del fenómeno resonante en las bahías de Alfacs y Fangar también se han analizado datos de nivel del mar en Valencia (MVAL), Barcelona (MBAR). Los datos de los dos primeros instrumentos son los registrados por la red de mareógrafos, REDMAR, de Puertos del Estado en esos puntos (Figura 9.1).

El mareógrafo de Valencia se encuentra localizado en el muelle de la Aduana, en la dársena interior ( $39^{\circ} 27' 42''$  N,  $0^{\circ} 19' 33''$  W) y comenzó su operación en julio de 1992. El mareógrafo de Barcelona está situado exactamente en el extremo este del muelle Álvarez de la Campa, frente al pantalán para petroleros del puerto de Barcelona ( $41^{\circ} 21' 01''$  N,  $2^{\circ} 9' 41''$  E); su instalación se hizo en agosto de 1992. Ambos instrumentos registran datos cada 5 minutos.

Entre la Figura 9.2 y la Figura 9.5 se presentan las series de tiempo durante 1999 y los regímenes de probabilidad del nivel del mar en Barcelona y Valencia.

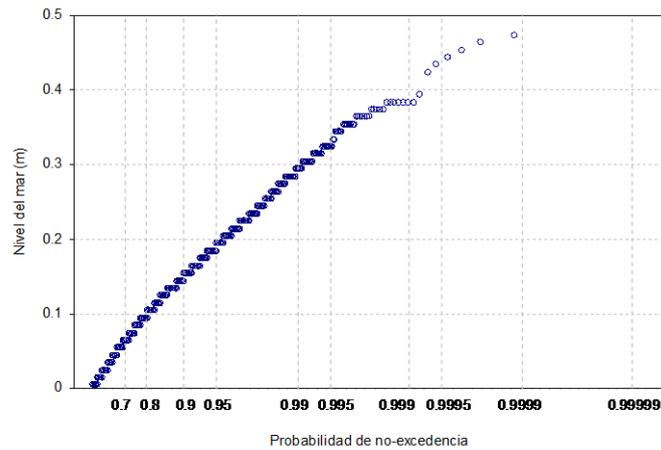


**Figura 9.1** Localización de la red de mareógrafos de Puertos del Estado



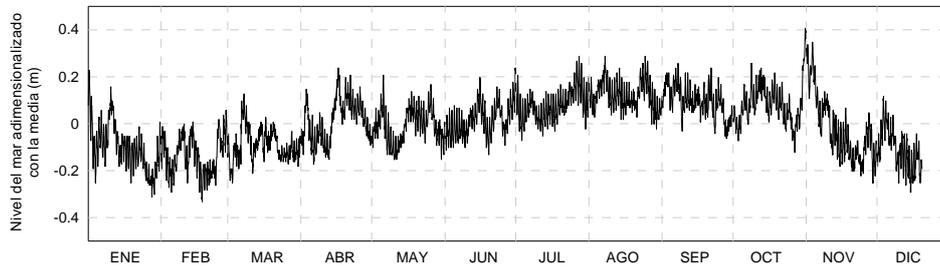
**Figura 9.2** Serie de nivel del mar en Barcelona en 1999

Los valores de nivel del mar registrados en Barcelona y Valencia son similares a los observados en el resto del mar Balear. En el Capítulo 4 de esta tesis se habían anticipado las amplitudes medias de algunos mareógrafos de esta zona del Mediterráneo español: Amplitudes medias de 0.63 m en Barcelona y de 0.54 m en Valencia. Al estar resguardado por las Islas Baleares, el mar Balear presenta magnitudes de marea ligeramente menores que en el Mar de Alborán y otras áreas cercanas, donde las amplitudes de la marea pueden llegar a 0.8 m e, incluso, 1.0 m. Precisamente ese mayor resguardo de Valencia hace que los datos de nivel del mar allí sean ligeramente menores que en Barcelona.

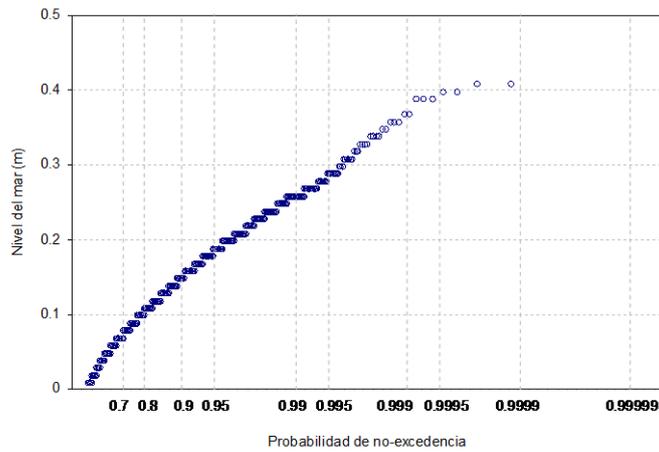


**Figura 9.3 Régimen de probabilidad del nivel del mar en Barcelona en 1999**

Si bien esto es evidente (amplitudes mayores en cerca de 0.1 m en Barcelona que en Valencia y San Carles de la Ràpita y l'Ampolla), aparentemente las series de tiempo de los cuatro sitios son muy parecidas. Es lógico que presenten similitudes en las componentes armónicas principales, por cuanto se encuentran en una costa de plataforma uniforme, abierta y de batimetría aproximadamente recta y paralela, y, por tanto, la onda de marea se propaga hacia la costa sin sufrir grandes modificaciones por el fondo o los contornos. No obstante, la localización exacta de los instrumentos, dentro de los puertos de ambas ciudades, puede generar una modificación de la serie exterior. Esto tiene más incidencia en las frecuencias altas que en las bajas, aunque la fricción a la que está sometida la onda también tiene mucha importancia en los valores de las amplitudes medias. Las ondas de análisis, entre 0.5 h y 3.3 h de período, pueden considerarse como de frecuencias medias a bajas. Por lo tanto, el análisis se debe circunscribir al análisis de frecuencias, más que a la comparación entre las magnitudes de la amplitud. Como se verá más adelante, algunas componentes que se observan en los registros de San Carlos de la Ràpita y l'Ampolla no se aprecian en Barcelona y Valencia.



**Figura 9.4** Serie de nivel del mar en Valencia en 1999



**Figura 9.5** Régimen de probabilidad del nivel del mar en Valencia en 1999

## 9.5 Modelación numérica de las ondas de borde

Como se dijo, el objetivo de este capítulo es doble: Por una parte, verificar, mediante modelación numérica, la existencia de un comportamiento regional, tipo onda de borde, de las frecuencias resonantes encontradas en Alfacs y Fangar. Y por otra parte, verificar con registros de nivel del mar en Valencia y Barcelona estos resultados. En el presente apartado se da respuesta al primer objetivo.

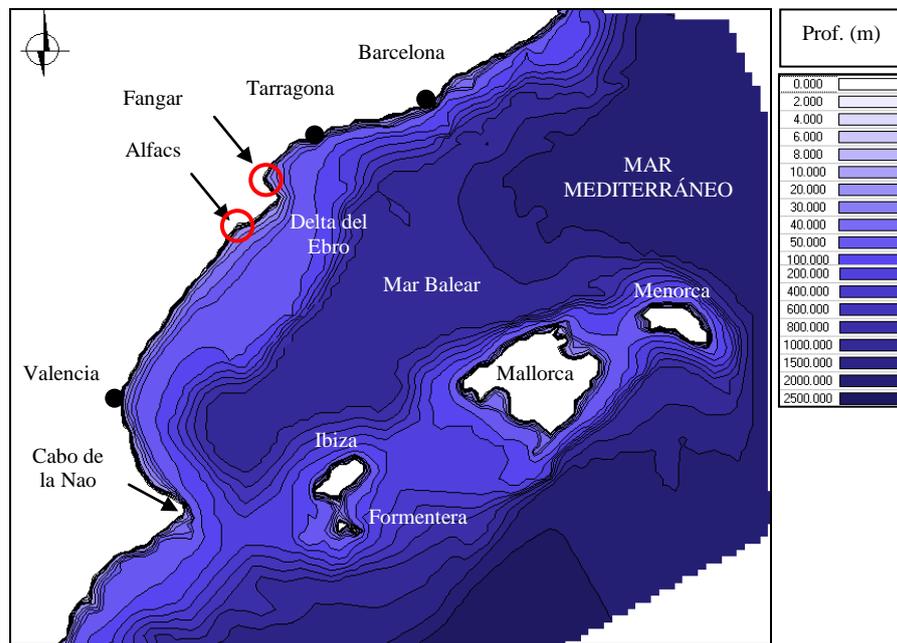
### **9.5.1 Descripción del modelo numérico empleado**

Tal como se hizo en el Capítulo 4, se ha utilizado un modelo numérico en elementos finitos denominado MSP, que ha sido desarrollado por el Instituto de Hidráulica Ambiental, “IH Cantabria”, de la Universidad de Cantabria. Dicho modelo es adecuado para observar los modos propios de oscilación de cualquier zona costera; su potencial radica en la capacidad de analizar el efecto de la reflexión múltiple de un tren de olas en el interior de una zona semicerrada, incluyendo todos los patrones de difracción producidos por los distintos contornos de la misma. Los detalles del modelo se pueden ver en el Anexo 2.

### **9.5.2 Batimetría y malla de propagación**

La batimetría utilizada para la simulación de las condiciones hidrodinámicas impuestas por ciertas ondas largas entre Valencia y Barcelona ha sido obtenida de la Carta Náutica 48 del Instituto Hidrográfico de la Marina, e incluye todo el mar Mediterráneo occidental y, por supuesto, el mar Balear.

En la Figura 9.6 se ve que el mar Balear es una cuenca marina claramente definida entre el archipiélago Balear y la línea de costa entre Valencia y Barcelona, con profundidades máximas del orden de los 1000 m. La plataforma continental es amplia, con un ancho de 60 km en promedio. La presencia de las islas (Ibiza, Formentera, Mallorca y Menorca), así como el cabo de Nao, son accidentes geográficos que influyen notablemente el comportamiento hidrodinámico de las ondas largas en el mar Balear.



**Figura 9.6 Batimetría general del Mar Balear**

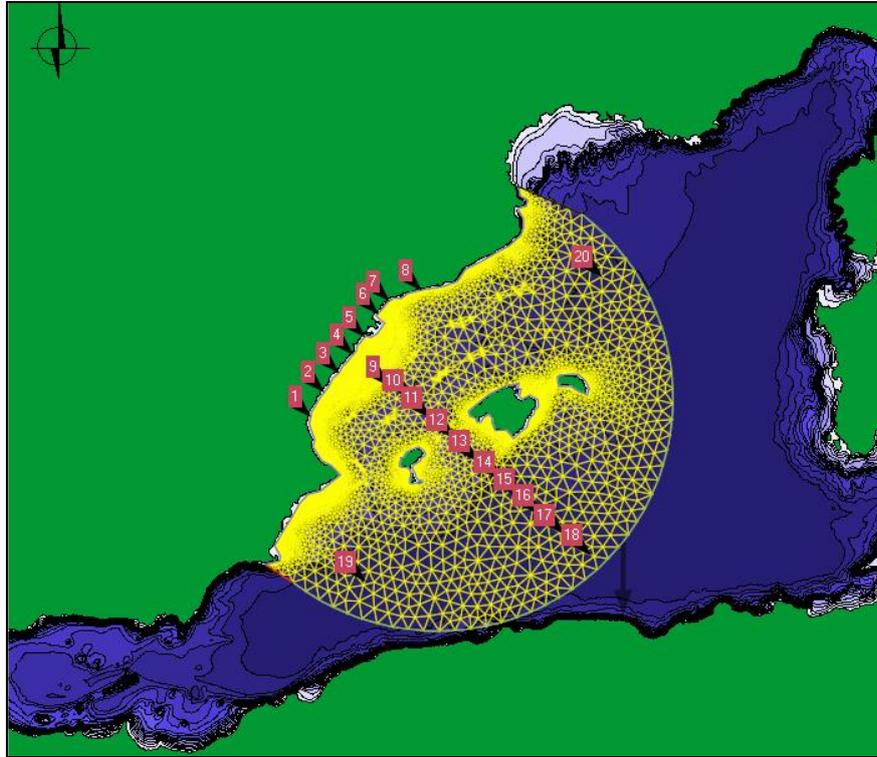
Precisamente porque existen tantos elementos morfológicos en esa zona, es importante que el dominio espacial de cálculo sea lo suficientemente amplio como para que no haya efectos diferentes a los que se requiere modelar numéricamente. Esto es particularmente importante en una malla tan grande como la que se debe considerar para ver las condiciones hidrodinámicas de una zona tan amplia como la del Mar Balear (175 km x 325 km). Debido a que la corona de la malla debe estar a la misma profundidad, es prácticamente imposible que esto ocurra en el Mar Mediterráneo, por lo que es de esperar que los resultados en el entorno cercano a ella no sean fiables.

Por otra parte, hay elementos morfológicos que evidentemente modifican la propagación de las ondas. Las Islas Baleares, incluyendo la plataforma somera que se forma entre ellas, se constituyen en una gran barrera que canaliza cualquier flujo. Las ondas se transforman en cuanto chocan contra la plataforma balear; gran parte de su energía se disipa y, fundamentalmente por difracción y refracción, otra parte alcanza a pasar por los espacios que existen entre las islas y entre estas y la zona continental, espacios que están repartidos a lo largo de todo el archipiélago. La incidencia de ondas larga hacia el mar balear se da, entonces, desde diferentes puntos cardinales, coincidentes con esos espacios “de paso”. Por

lo tanto, una malla con una corona que permita la generación de ondas desde cualquier dirección es fundamental para resolver este problema.

Por estas dos razones, 1) garantizar una buena distancia entre la zona de generación y la zona de interés que permita disminuir los resultados poco fiables relacionados con una profundidad constante de la corona de la malla y 2) garantizar que haya ondas desde todas las direcciones para representar correctamente la realidad del archipiélago Balear, se propone una malla con corona circular como la que se muestra en la figura 9.7. Por la costa, el dominio se ha llevado hacia el Norte hasta el Golfo de Marsella y hacia el Sur hasta Cartagena. Por el mar, el contorno se ha puesto en la plataforma continental de Argelia. De esta manera se crea una zona suficientemente amplia como para generar las ondas de interés sin que se vean afectadas considerablemente por las características de la zona de generación; es decir, las ondas generadas se pueden desarrollar sin efectos negativos producto de aspectos puramente numéricos. La distancia de 200 km entre la corona de la malla y el inicio de la plataforma Balear se considera más que apropiado para la modelación.

Como se mencionó en el Capítulo 5, las mallas de propagación a utilizar en este tipo de modelos dependen de la longitud de onda de la oscilación que se desea representar, siendo deseable disponer de al menos 10 elementos por longitud de onda. En la corona de la malla se define la dirección, amplitud y el período de la onda incidente. Además, la localización de cada elemento de la malla depende de la profundidad a la que se encuentra. La malla de propagación para este caso es la que se muestra en la siguiente figura, que corresponde al nivel de media marea. El período mínimo representativo para la generación de la malla fue de 1.000 s, mientras que 15 fue el número de elementos por longitud de onda.



**Figura 9.7 Malla de propagación y puntos de análisis en la plataforma continental entre Valencia y Barcelona**

### **9.5.3 Resultados**

De la misma manera que se hizo en Alfacs y Fangar (Capítulo 5), con el fin de ver el período resonante de la plataforma continental entre Valencia y Barcelona se ha hecho un “barrido de frecuencias”. En este caso, los períodos de onda varían 50 s entre sí. El período mínimo de análisis ha sido de 1500 s, mientras que el período máximo ha sido de 14000 s. De esta manera, se puede obtener la respuesta resonante de la plataforma, ante todas estas ondas, en varios puntos de análisis (Ver figura 9.7).

Es de recordar que, en ausencia de fricción y contornos totalmente reflejantes, cuando el período de la excitación coincide con el período resonante de una dársena, la oscilación se

hace infinita. En la realidad esto no ocurre puesto que al aumentar la oscilación, los efectos de fricción y absorción parcial de los contornos limitan el crecimiento de la oscilación resonante. Si deseáramos que nuestro modelo de simulación numérica representara adecuadamente el fenómeno, este modelo debería incluir valores adecuados de la fricción y reflexión de los contornos que evitaran la amplificación excesiva de la agitación resonante. No obstante, nuestro interés es observar claramente los modos resonantes, por lo que la ausencia de fricción y los contornos totalmente reflejantes hacen fácil esta identificación.

El análisis sin fricción y con contornos totalmente reflejantes se ha hecho para el nivel de media marea. Las figuras siguientes muestran los resultados obtenidos de amplificación entre el punto P18 (justo por fuera de la plataforma continental) y cualquiera de los otros puntos analizados en la plataforma, de tal manera que el coeficiente de amplificación entre esos dos puntos puede calcularse como:

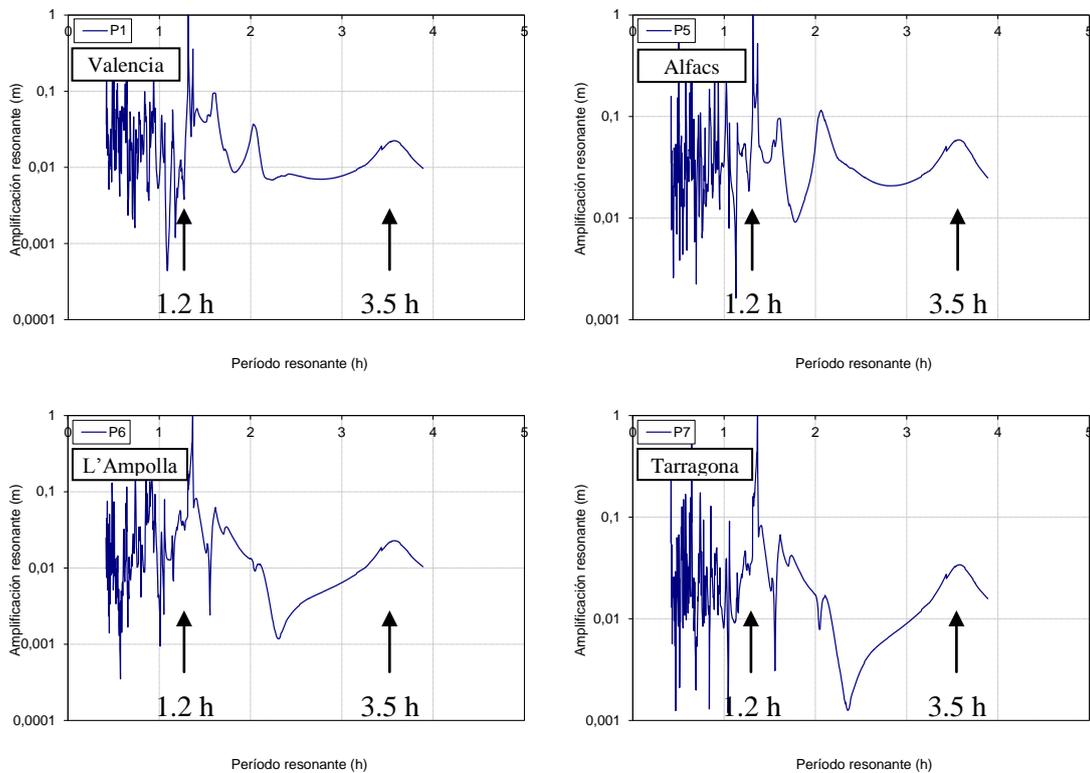
$$K_a = H_{P18}/H_{Pi}$$

Donde:

$H_{P18}$ : Altura de ola por fuera de la plataforma continental

$H_{Pi}$ : Altura de ola en el punto i

Los valores se han adimensionalizado con el máximo valor de  $K_a$  obtenido en cada punto, por lo que los resultados no son comparables punto a punto. Únicamente sirven como referencia para ver el comportamiento de la amplificación resonante en un sitio determinado.



**Figura 9.8 Coeficiente de amplificación adimensionalizado en la plataforma continental Valencia-Barcelona. Media marea**

En términos generales, se puede ver que en la plataforma continental entre Valencia y Barcelona existen ondas con cierta importancia en  $\sim 3.5$  h,  $\sim 1.5$  h,  $\sim 1.2$  h,  $\sim 0.7$  h y  $\sim 0.5$  h. En cuanto a su energía, parece que existen tres grupos de ondas: 1) Ondas con períodos entre 0.5 h y 1.0 h, con energías medias, 2) ondas con períodos en torno a 1.5 h con la mayor energía observada en la plataforma y 3) ondas entre 2.0 h y 3.5 h de período, con las menores energías. Todas ellas coinciden con los modos de oscilación registrados en Alfacs y Fangar, por lo que parece evidente que esas ondas existen en estas últimas porque existen en la plataforma continental. La amplificación resonante de estas ondas en las bahías, descrita con detalle en los Capítulos 4 y 5, se debe a la coincidencia del período de estas ondas con las características geométricas del espacio en el que se propagan.

No obstante, en cada sitio analizado se observan diferentes magnitudes en estos modos de oscilación de la plataforma. Así, por ejemplo,  $\sim 3.3$  h parece ser más fuerte entre Valencia y Alfacs. Evidentemente, entre estos dos sitios hay una mayor longitud de la plataforma

continental en relación con el tramo Fangar-Barcelona, lo que está directamente relacionado con los períodos de los modos propios de oscilación de la misma. Cuanto mayor es la distancia, menores las frecuencias resonantes (Ver ecuación 9.1). Por esta razón, en ese tramo se observa más energía en esos mayores períodos. Por el contrario, entre Fangar y Barcelona se observa menor energía en esa frecuencia. En todos los puntos analizados, la mayor energía se obtuvo en  $\sim 1.5$  h.

Estos resultados corroboran las observaciones realizadas en los registros de nivel del mar de ambas bahías, Alfacs y Fangar. En la primera hay modos resonantes de mayor período que en la segunda. La razón de esta diferencia puede estar en la marcada influencia del delta del Ebro, cuya presencia produce una fragmentación de la plataforma continental entre Valencia y Barcelona. Morfológicamente se han creado dos “semi-plataformas”, cada una con características geométricas que implican diferentes formas de oscilación. Ambas están conectadas entre sí, lo que implica una correspondencia biunívoca entre ellas. Comparativamente se puede explicar de manera similar en la que se ha logrado definir el comportamiento de la resonancia en dos bahías adyacentes, como ocurre con las *rissagues* en Ciutadella y Platja Gran, en Menorca (Marcos *et al*, 2004). Si no existiera el delta del Ebro, se observaría una continuidad en las isóbatas que generaría menor cantidad de ondas resonantes en la plataforma continental.

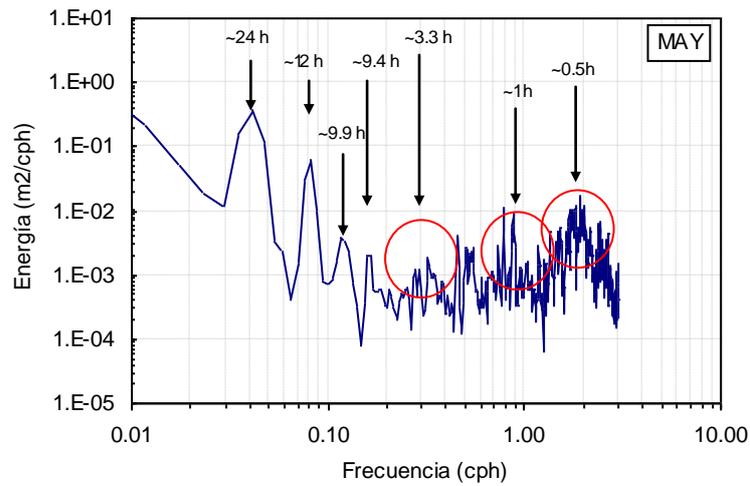
Estas conclusiones parecen demostrar, en una primera instancia, que existe un mecanismo intermedio de plataforma entre el mecanismo generador identificado hasta el momento (la presión atmosférica) y la amplificación resonante en ambas bahías.

## **9.6 Análisis de datos de nivel del mar en Barcelona y Valencia**

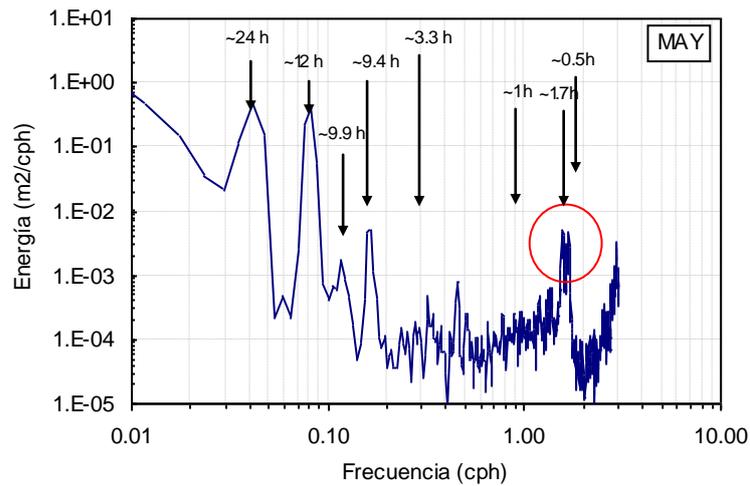
Se ha visto, por medio de modelación numérica, que existe una onda de borde en la plataforma continental entre Valencia y Barcelona que podría ser un mecanismo intermedio

---

entre la presión atmosférica y la amplificación resonante en Alfacs y Fangar. Con el objeto de verificar si esas frecuencias encontradas (3.3 h y 1.1 h) en dicha plataforma continental aparecen en otros registros localizados en la misma, se ha hecho un análisis espectral a los datos de nivel del mar de Valencia y Barcelona. La figura siguiente muestra los resultados encontrados para el mes de mayo de 1999.



**Figura 9.9** Espectro de Fourier de la serie de nivel del mar de 1999 en Valencia



**Figura 9.10** Espectro de Fourier de la serie de nivel del mar de 1999 en  
**Barcelona**

En las gráficas anteriores se observa que mientras en Valencia existe energía en 3.3 h, 1.1 h y 0.5 h, en Barcelona no. En cambio, en los registros de nivel del mar de este último se aprecia un pico importante alrededor de 1.7 h de período, lo que demuestra la desarticulación resonante en plataforma existente entre los dos sitios. La desembocadura del río Llobregat, al sur de Barcelona puede ejercer un efecto “espigón” que no permita el libre movimiento de la onda de borde; sin embargo, es quizás más evidente el hecho de que Barcelona está por fuera de la plataforma Valencia-Tarragona, lo que es suficiente argumento para explicar este hecho.

## 9.7 Conclusiones

A la luz de los resultados obtenidos en el presente capítulo, se puede concluir lo siguiente:

Mediante modelación numérica se ha comprobado que existen unas ondas de borde en la plataforma continental entre Valencia y Barcelona de frecuencia igual ( $\sim 3.3$  h,  $\sim 1.1$  h y  $\sim 0.5$  h) a la de los modos propios de oscilación de las bahías de Alfacs y Fangar. Se observan también frecuencias en  $\sim 1.5$  h y  $\sim 0.7$  h, coincidiendo con otros modos identificados en estos sitios.

Estos resultados también se observan en los registros de nivel del mar de Valencia. En los registros de nivel del mar en Barcelona, por el contrario, no se notan estos picos resonantes en los modos identificados, lo que permite concluir que, en efecto, el fenómeno observado en Alfacs y Fangar es de una génesis regional asociado a las características geométricas de la plataforma continental entre Valencia y Barcelona. En estas dos bahías se observa, simplemente, una amplificación resonante de esas ondas observadas en la plataforma.

# **10. SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA PRESIÓN ATMOSFÉRICA COMO MECANISMO GENERADOR DE LA RESPUESTA RESONANTE EN ALFACS Y FANGAR**

## **10.1 Introducción**

En diferentes capítulos de este documento se ha demostrado que la presión atmosférica puede ser un mecanismo forzador de los eventos resonantes en Alfacs y Fangar. Parece ser que existen ondas de borde en la plataforma continental Valencia-Tarragona del mismo período que se convierten en un mecanismo intermedio entre dicha onda de presión atmosférica y la respuesta resonante de ambas bahías (Capítulo 9). Con el ánimo de

demostrar que la hipótesis planteada (La onda de presión atmosférica genera ondas de borde en  $\sim 3.3$  h,  $\sim 1.1$  h y  $\sim 0.5$  en la plataforma continental Valencia-Tarragona y éstas, a su vez, generan una amplificación resonante en Alfacs y Fangar) es cierta, a continuación se modelan numéricamente las condiciones de presión atmosférica de ciertos días y se observa la respuesta en la plataforma continental, tal como se describe a continuación.

## **10.2 Modelo general del comportamiento resonante en Alfacs y Fangar**

En el apartado 10.1 se mencionó rápidamente la hipótesis general que se quiere modelar numéricamente, con el fin demostrarla. Se ha llegado a ella a partir de un análisis exhaustivo de registros de nivel del mar y presión atmosférica en Alfacs, Fangar, Valencia y Barcelona; se ha usado, además, la modelación numérica tipo MSP para verificarla. En diferentes capítulos se ha evidenciado la forma en la que un pulso de presión atmosférica desencadena una resonancia en la plataforma continental por medio de ondas de borde y estas, a su vez, generan ondas que coinciden con los modos propios de oscilación de las bahías analizadas.

A continuación se explica con más detalle esta hipótesis:

- La onda de presión atmosférica genera ondas de borde en  $\sim 3.3$  h,  $\sim 1.1$  h y  $\sim 0.5$  en la plataforma continental Valencia-Tarragona. Estos períodos coinciden con los modos propios de oscilación de la misma plataforma.
- Dichas ondas de borde generan una amplificación resonante en Alfacs y Fangar en las mismas frecuencias.
- La magnitud de estos eventos resonantes es mayor cuando la dirección de la onda de presión atmosférica es paralela a la plataforma continental.

- La velocidad de propagación de la onda de presión atmosférica también influye en la magnitud de los eventos resonantes.

### **10.3 Modelación numérica de la superficie libre mediante pulsos de presión atmosférica**

Como bien se ha dicho en capítulos anteriores, la modelación numérica de ondas se ha convertido en una potente herramienta, ampliamente utilizada, para representar o predecir el comportamiento de ciertos fenómenos. La imposibilidad de tener una red de instrumentos suficientemente amplia, que permita determinar los niveles y la velocidad del agua en un nutrido grupo de puntos y así tomar las decisiones pertinentes, hace que herramientas que sí lo hagan cobren bastante importancia. Cuando se busca observar el comportamiento hidrodinámico del mar Mediterráneo español, una vasta zona, esas herramientas son vitales. En este caso, la modelación numérica lo hace. Con ella, se puede generar suficiente cantidad de puntos espacialmente distribuidos, así como obtener en ellos resultados a lo largo de un período de tiempo apropiado como para captar la influencia de fenómenos de mayor escala que varían temporalmente de manera acusada. Es más, la complejidad que resulta de la interacción océano-atmósfera, sobre todo en el caso que nos ocupa (ondas de presión generando ondas de borde en la plataforma continental Valencia-Tarragona y éstas a su vez produciendo un efecto resonante en Alfacs y Fangar), puede ser fácilmente establecida con los modelos numéricos actuales.

La modelación numérica permite, en este caso, obtener varios resultados. En primera instancia, se puede determinar en cada momento el nivel del agua en cualquier punto del mar Mediterráneo, a partir de pulsos de presión atmosférica de diferentes características y así es fácil comparar la influencia de las variables definidas en capítulos anteriores en la resonancia de Alfacs y Fangar; es decir, los resultados se orientan a comprender y entender los procesos físicos de generación y propagación de las ondas que generan fenómenos resonantes en esas dos bahías. En segunda instancia, se pueden obtener otros resultados que podrán ser

utilizados con otros fines y objetivos diferentes a los de esta tesis: elaborar mapas de inundación que son empleados en el diseño de planes de emergencia, contingencia y evacuación; planificar la construcción de infraestructuras costeras y la elaboración de planes de ordenamiento del territorio; o establecer las condiciones ecológicas necesarias en algunas geoformas de la plataforma continental analizada.

Como bien se ha podido establecer, las ondas resonantes en Alfacs y Fangar parecen estar influenciadas por ondas de presión atmosférica con ciertas características, mencionadas en el apartado anterior. El modelo numérico que se pretende utilizar es capaz de resolver adecuadamente todas las variables que participan en el fenómeno.

### ***10.3.1 Descripción del modelo numérico empleado***

- **Tipos de modelos numéricos para la solución de ondas largas**

Varios son los tipos de modelos comúnmente utilizados para modelar numéricamente el comportamiento de ondas largas. Una descripción de ellos puede encontrarse claramente resumida en Otero (2008) y, aunque con aplicación para ondas cortas, en Liu y Losada (2000).

Modelos tipo MSP, que resuelven la ecuación de la pendiente suave, son fáciles de utilizar y permiten obtener resultados rápidamente, tal como se demostró los capítulos 5 y 9. No obstante, sus limitaciones son evidentes: 1) Sus fundamentos en la teoría lineal de ondas no permiten determinar la interacción energética que puede haber entre diferentes frecuencias, 2) Cambios bruscos en la batimetría, como podría ocurrir en el talud continental, no son resueltos correctamente, 3) No es posible obtener resultados con variaciones temporales ni tampoco ser alimentados por campos meteorológicos, causa primaria de la generación de gran cantidad de ondas. Por todas estas razones, es adecuado utilizar un modelo tipo MSP para obtener resultados rápidamente, para verificarlos o simplemente para evaluar la respuesta de un cuerpo de agua en el dominio frecuencial más que en el dominio temporal.

Con el ánimo de corregir esas deficiencias, últimamente se han venido desarrollando mucho los modelos tipo Boussinesq. Asumiendo que tanto la no linealidad como la dispersión frecuencial son débiles y del mismo orden de magnitud, Peregrine (1967) derivó las ecuaciones estándar de Boussinesq, para fondo variable. Posteriormente las modificó, utilizando como variable la velocidad en el fondo o en la superficie libre. Dado que esta aproximación exige asumir que los efectos de la dispersión frecuencial y no lineales sean débiles, las ecuaciones estándar de Boussinesq no son aplicables en profundidades muy reducidas donde los efectos no lineales empiezan a ser más importantes que los efectos de la dispersión frecuencial, ni en profundidades indefinidas donde la dispersión frecuencial es del orden de la unidad. Las ecuaciones estándar de Boussinesq formuladas en función de la velocidad promediada en vertical, dejan de ser válidas cuando la profundidad es mayor que un quinto de la longitud de onda equivalente en profundidades indefinidas. Con una serie de modificaciones (Madsen et al., 1991; Nwogu, 1993; Chen and Liu, 1995), las ecuaciones modificadas de Boussinesq son válidas para modelar la propagación de ondas desde profundidades indefinidas hasta profundidades reducidas, incluyendo la resonancia portuaria (Díaz, 2007). Por lo tanto, los modelos de tipo Boussinesq permiten simular de forma adecuada la propagación de ondas de origen meteorológico generadas en un dominio espacial amplio como el del Mediterráneo español, donde los términos dispersivos juegan un papel importante. Sin embargo, presentan la gran desventaja de requerir una gran resolución espacial y temporal para evitar inestabilidades numéricas durante el cálculo, de los términos dispersivos de las ecuaciones, que son derivadas de alto orden. Ello se traduce en el empleo de una gran cantidad de tiempo de cómputo en sus cálculos. Por lo tanto, estos modelos son poco eficientes para evaluar la influencia de ondas de borde en los fenómenos resonantes de zonas semicerradas muy localizadas cuya génesis está definida por fenómenos de mucha mayor escala.

Los modelos basados en las ecuaciones de aguas someras, EAS, tanto en su forma lineal como no lineal, son útiles, prácticas y precisas a la hora de querer observar el comportamiento de ondas con los períodos de los meteotsunamis. Estas ecuaciones han sido resueltas por varios autores discretizando espacialmente el dominio de diferentes maneras: diferencias finitas, elementos finitos y volúmenes finitos. Los primeros son los utilizados más comúnmente (Liu *et al.*, 1994), aunque también desde hace tiempo se han implementado con éxito este tipo de modelos en elementos finitos. La implementación de las diferencias

finitas tiene inconvenientes cuando se están tratando con discontinuidades del flujo la conservación de volumen llega a ser un inconveniente para los modelos basados en la forma diferencial no conservativa. Por el contrario, el método de volúmenes finitos tiene la ventaja de resolver la forma integral de las ecuaciones no lineales de aguas someras como un esquema completamente conservativo. Una clase de estos métodos, los del tipo “Godunov” (LeVeque, 1998) ofrecen algunas ventajas: 1) tienen la capacidad de representar correctamente las ondas discontinuas (bores) y por lo tanto sus propiedades, tales como su velocidad de propagación y su forma (Toro y García-Navarro, 2007), 2) la validez de las hipótesis de partida se mantiene en las regiones alrededor de las interfaces seco-mojado, permitiendo resolver correctamente los casos de inundación de la costa. No obstante, tiene también una gran desventaja: son métodos complejos y computacionalmente costosos. En el caso en el que se consideran condiciones focales, como ocurre con la generación de un tsunami, puede haber también inexactitudes a la hora de resolver las EAS, pero ese no es el caso que ocupa esta tesis.

Debido a que en la propagación de meteotsunamis en la plataforma continental Valencia-Tarragona y su efecto resonante en Alfacs y Fangar no ocurren discontinuidades en el flujo, como por ejemplo una rotura de onda o un bore, y a que el costo computacional es alto en el caso de modelos numéricos que resuelven las EAS mediante volúmenes finitos, se ha seleccionado un modelo que las resuelve en diferencias finitas, C3 (Cantabria – COMCOT – TsunamiCLAW), desarrollado por Liu *et al.*, (1994). A continuación se describe brevemente el modelo.

- **Ecuaciones de gobierno del modelo numérico utilizado**

Partiendo de las ecuaciones de cantidad de movimiento de conservación de la masa se deducen las ecuaciones de Reynolds. De estas, asumiendo que el flujo es horizontal, y por lo tanto integrando las ecuaciones en vertical, se obtienen las ecuaciones No Lineales de ondas en aguas someras (ENLAS). Estas ecuaciones son las de continuidad y cantidad de movimiento, válidas cuando el flujo tiene un carácter bidimensional. Esta derivación se realiza asumiendo las siguientes hipótesis con respecto al movimiento:

- Las ondas largas son aquellas cuya longitud de onda es muy superior a la profundidad ( $L \gg h$ ). En términos de teoría de ondas esta condición suele expresarse como ( $kh < \pi/10$ ), donde  $k$  es el número de onda ( $k = 2\pi/L$ ),  $L$  es la longitud de onda y  $h$  la profundidad. Esta condición implica que las aceleraciones verticales son muy pequeñas, y por tanto, las principales características del sistema están contenidas en la variación horizontal de las propiedades integradas en la profundidad. Por lo que las velocidades ( $u, v$ ) son independientes de la profundidad y la distribución de presiones es hidrostática.

Además, teniendo en cuenta que el propósito es emplear estas ecuaciones para simular la propagación de meteotsunamis, es posible asumir como hipótesis adicionales, para esta aplicación, que:

- No hay variaciones de presiones en la superficie del agua y los esfuerzos cortantes debidos al viento son despreciables.
- El fluido es homogéneo con densidad constante.
- La contribución de los términos de tensiones turbulentas es mucho menor con respecto a los demás términos de la ecuación de cantidad de movimiento, por lo que la disipación debido a la turbulencia puede ser representada, junto con las tensiones del fondo. Varios autores acuerdan que estos términos no son importantes en la propagación de meteotsunamis, debido a las escalas temporales y espaciales del fenómeno, (Liu *et al.*, 1994). Es relevante la turbulencia si se presentara la rotura de la onda cerca de la costa y la formación del bore, pero eso no ocurre en el caso que nos ocupa.

Las ecuaciones de onda larga en aguas someras forman un sistema hiperbólico de ecuaciones en diferencias parciales, que en su forma conservativa se pueden representar como:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(Hu)}{\partial x} + \frac{\partial(Hv)}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(Hu) + \frac{\partial}{\partial x}(Hu^2 + \frac{1}{2}gH^2) + \frac{\partial}{\partial y}(Huv) = gH \frac{\partial h}{\partial x} - \tau_x + f_c H v$$

(10.1)

$$\frac{\partial}{\partial t}(Hv) + \frac{\partial}{\partial x}(Huv) + \frac{\partial}{\partial y}(\frac{1}{2}gH^2 + Hv^2) = gH \frac{\partial h}{\partial y} - \tau_y - f_c H u$$

Donde las variables dependientes del problema son la profundidad del agua  $H = (h + \zeta)$ , siendo  $\zeta$  la elevación de la superficie libre y  $h$  la profundidad del agua en reposo;  $(x, y)$  la longitud y la latitud de la tierra,  $g$  es la aceleración de la gravedad;  $(\tau_x, \tau_y)$  son los términos que representan las tensiones con el fondo;  $f_c$  parámetro de Coriolis y  $(u, v)$  las velocidades promediadas en profundidad en las direcciones  $x$  e  $y$ , respectivamente. Los términos de tensiones en el fondo  $\tau_x$  y  $\tau_y$ , representan la fricción que experimenta el flujo con el fondo. El término de fricción es un término consumidor de cantidad de movimiento y tiene un efecto no lineal de retardo del flujo.

Cuando no se considera ningún modelo de turbulencia, como en este caso, la disipación de energía debida a las tensiones efectivas se puede suponer que se incluye en el término de tensión con el fondo, es decir, mediante el coeficiente de fricción no se pretende aproximar solamente el efecto de las tensiones en el fondo, sino también el efecto de todo el término de tensiones efectivas. En este trabajo se seleccionó, para representar el término de fricción en las ecuaciones, la ley cuadrática, utilizando la fórmula de Manning:

$$\tau_x = \frac{gn^2}{H^{1/3}} u \sqrt{u^2 + v^2}, \quad \tau_y = \frac{gn^2}{H^{1/3}} v \sqrt{u^2 + v^2} \quad (10.2)$$

Donde  $n$  es el coeficiente de Manning, que puede tomar valores típicos entre  $n=0.013$  y  $n=0.025$  dependiendo de la aplicación y el tipo de fondo.

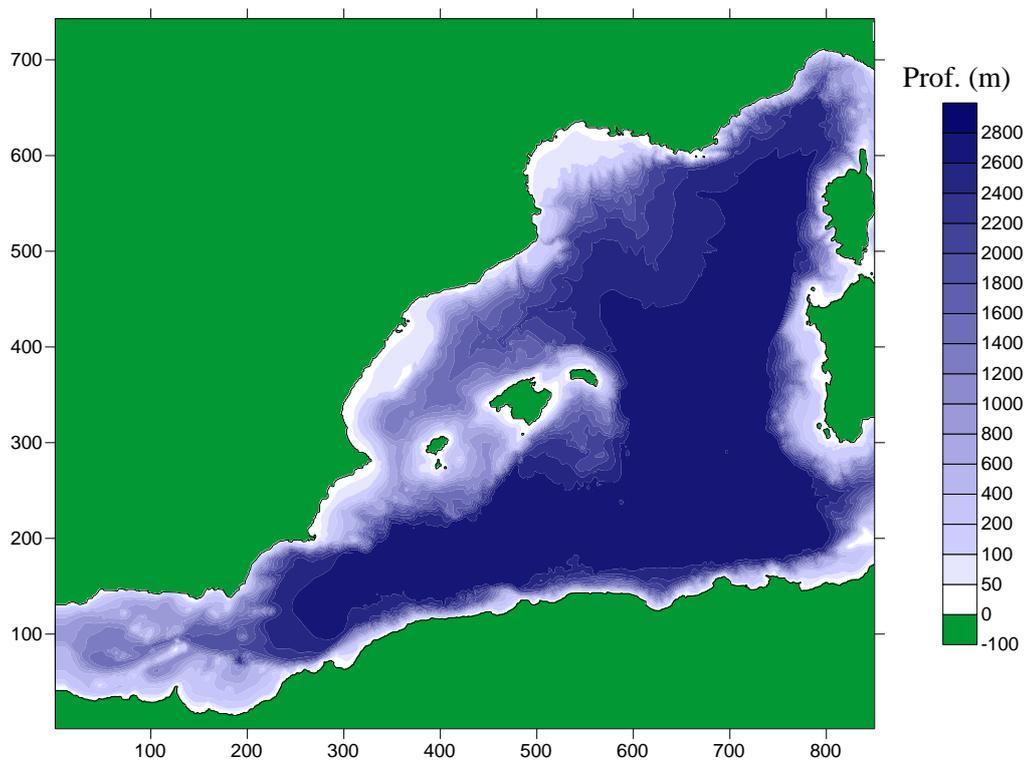
---

Esta forma de presentar las ecuaciones tiene grandes ventajas a la hora de plantear esquemas de resolución que permitan obtener soluciones con discontinuidades, como se ampliará en los apartados subsiguientes. Además, son la expresión más directa de las leyes de conservación que gobiernan el fenómeno físico.

### ***10.3.2 Batimetrías y mallas de generación***

La batimetría utilizada para la simulación de las condiciones hidrodinámicas impuestas por la onda de presión atmosférica en la zona de análisis (Plataforma continental entre Valencia y Tarragona) comprende el mar Mediterráneo entre al estrecho de Gibraltar y Córcega y Cerdeña, tal como se aprecia en la siguiente figura.

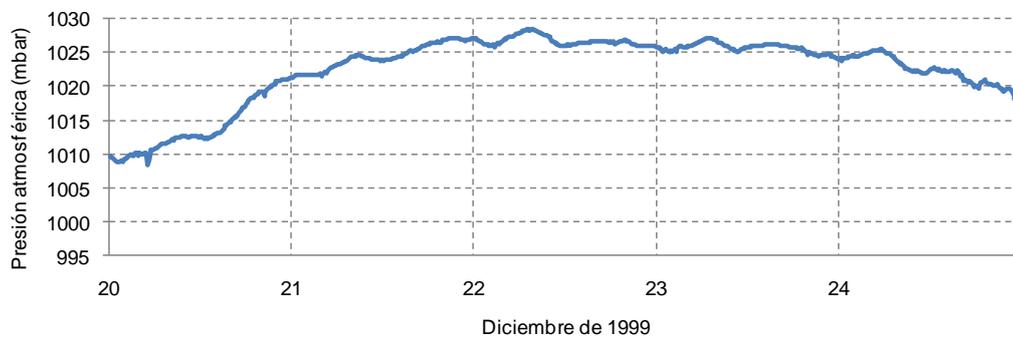
En este caso se ha usado una malla en diferencias finitas de 1500 m x 1500 m. La presión atmosférica ingresa a la malla por el contorno que le corresponde según el caso de análisis.



**Figura 10.1 Batimetría general del Mediterráneo**

### ***10.3.3 Serie de datos***

Buscando demostrar la hipótesis planteada, se han usado los datos de presión atmosférica registrados en San Carles de la Ràpita (bahía de Alfacs) entre el 20 y el 24 de diciembre de 1999. Los datos tienen una frecuencia de registro de 10 minutos. La figura siguiente muestra la serie de tiempo de dichos datos.



**Figura 10.2 Serie de presión atmosférica en San Carles de la Ràpita entre 20/12/99 y el 24/12/99**

### ***10.3.4 Casos de análisis***

El objetivo de este apartado es modelar, para una misma serie de presión atmosférica de cinco días (20/12/99 - 24/12/99), diferentes condiciones de dirección de incidencia de dichas ondas y diferentes condiciones de velocidad de la misma, para observar su incidencia en la generación y propagación de la onda de borde en la plataforma continental Valencia-Tarragona. Los casos analizados son los siguientes:

**Tabla 10.1. Casos analizados**

CASO	DIRECCIÓN DE LA PRESIÓN ATMOSFÉRICA (°)	VELOCIDAD DE LA PRESIÓN ATMOSFÉRICA (m/s)
1	135 (*)	10
2	135	20
3	135	30
4	135	40
5	135	50
6	135	60
7	135	70
8	135	80
9	135	90
10	135	100
11	45 (**)	10
12	45	20
13	45	30
14	45	40
15	45	50
16	45	60
17	45	70
18	45	80
19	45	90
20	45	100

(\*): 135° es una onda de presión atmosférica que viaja perpendicular a la plataforma continental.

(\*\*): 45° es una onda de presión atmosférica que viaja paralela a la plataforma continental.

### **10.3.5 Resultados**

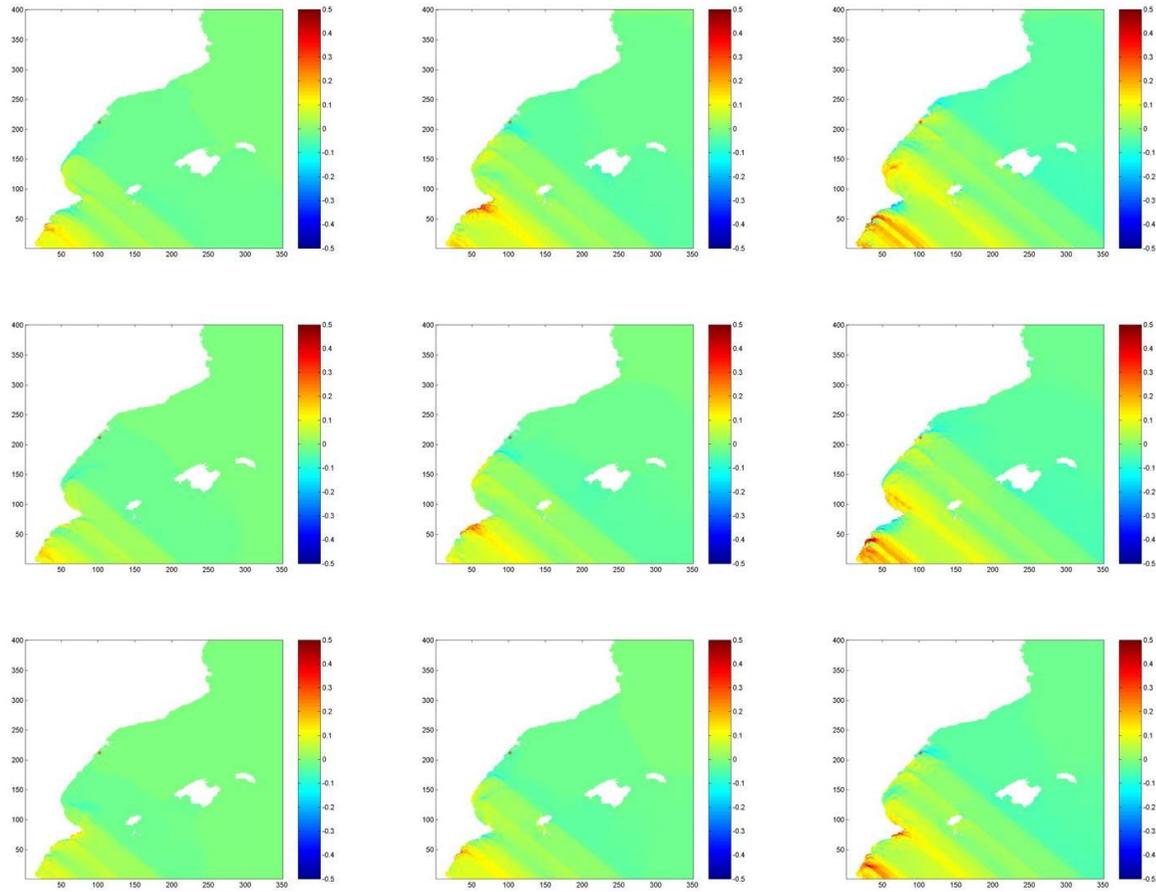
- **Resultados generales a nivel espacial**

A continuación se presentan los resultados a nivel espacial de algunos casos de análisis. Las velocidades utilizadas para la simulación oscilaron entre los 10-100m/s y con direcciones de incidencia de la onda a 45° y 135°, lo que implica que en el sistema de referencia de los casos de modelación la onda incide de manera paralela (45°) y perpendicular (135°) al eje longitudinal de la plataforma continental entre Valencia y Tarragona.

A manera ilustrativa, entre la figura 10.3 y la figura 10.4. se presentan los resultados de la simulación con velocidad de la onda de 20 m/s y en las figuras 10.5 y 10.6 los obtenidos con una velocidad de 50 m/s., todas ellas para una dirección de propagación de la onda de presión de 45°. Las figuras 10.7 y 20.8 muestran el caso en el que la velocidad de propagación de la onda atmosférica es de 30 m/s con una dirección de 135°.

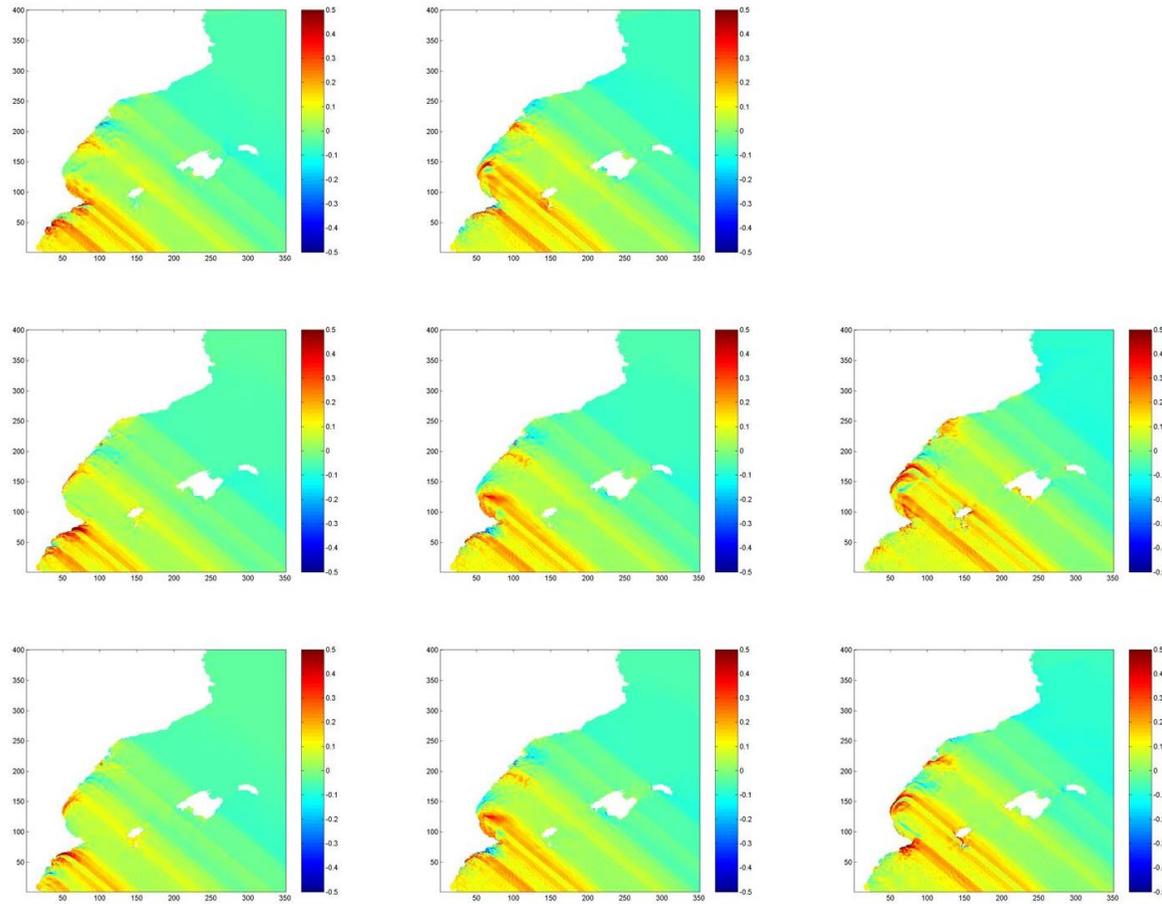
El eje  $x$  y  $y$  son los ejes locales de la malla de simulación. El cambio en la superficie del mar está enmarcado en una escala de colores que oscila entre los -0,5m y 0,5m.

En las figuras se observan claramente los efectos de difracción que generan los accidentes morfológicos como el Cabo de la Nao (Ver localización de estos accidentes en la figura 10.9) y las Islas Baleares. Nótese además que independientemente de la velocidad o dirección de propagación de la onda de presión atmosférica, las máximas amplitudes, caracterizadas en las figuras por un color rojo, siempre se obtienen a lo largo de la plataforma continental entre Valencia y Tarragona, sobre todo en proximidades del delta del Ebro, o alrededor de las Islas Baleares, principalmente en torno a Mallorca.



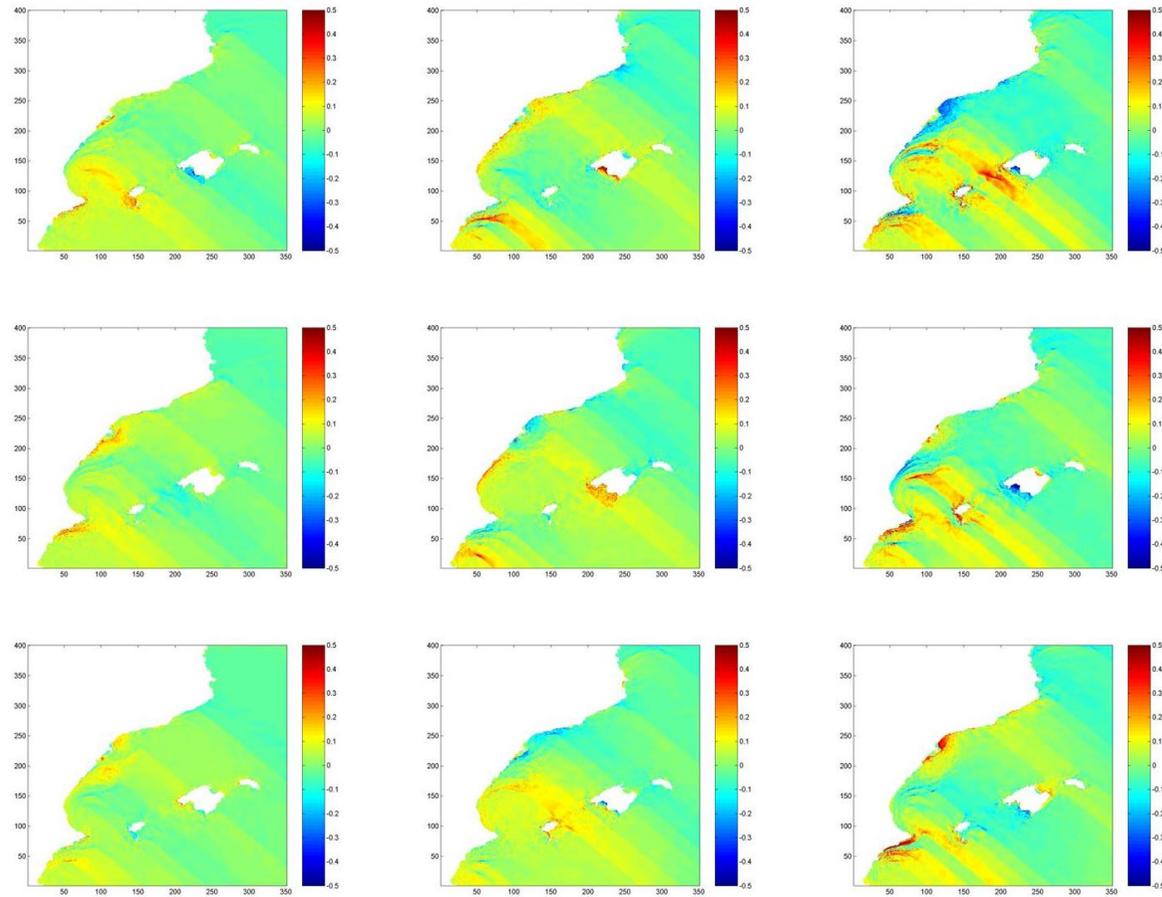
**Figura 10.2** Evolución de la superficie del mar entre  $t=180\text{min}$  y  $t=340\text{min}$  de ejecución. Velocidad de la onda:  $20\text{m/s}$ . Dirección de la onda:  $45^\circ$

---



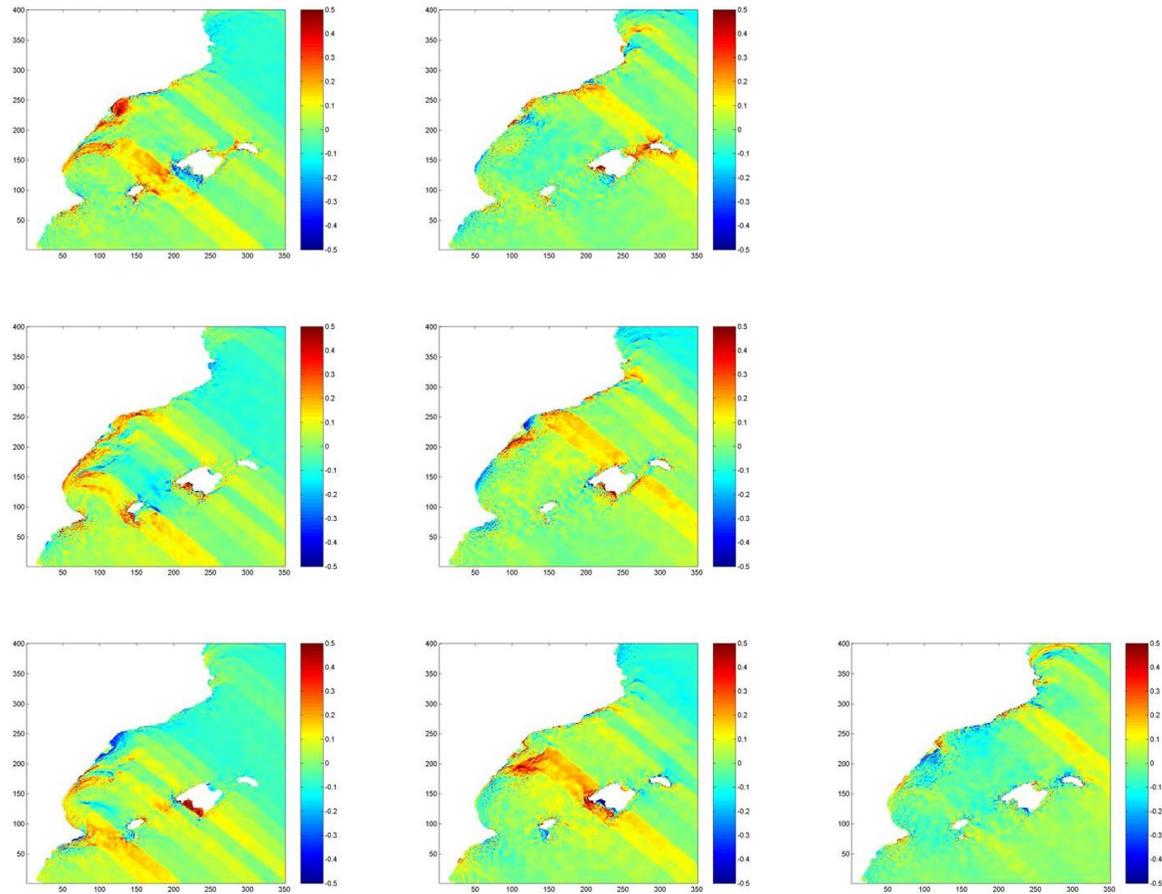
**Figura 10.3** Evolución de la superficie del mar entre  $t=360\text{min}$  y  $t=500\text{min}$  de ejecución. Velocidad de la onda:  $20\text{m/s}$ . Dirección de la onda:  $45^\circ$

---



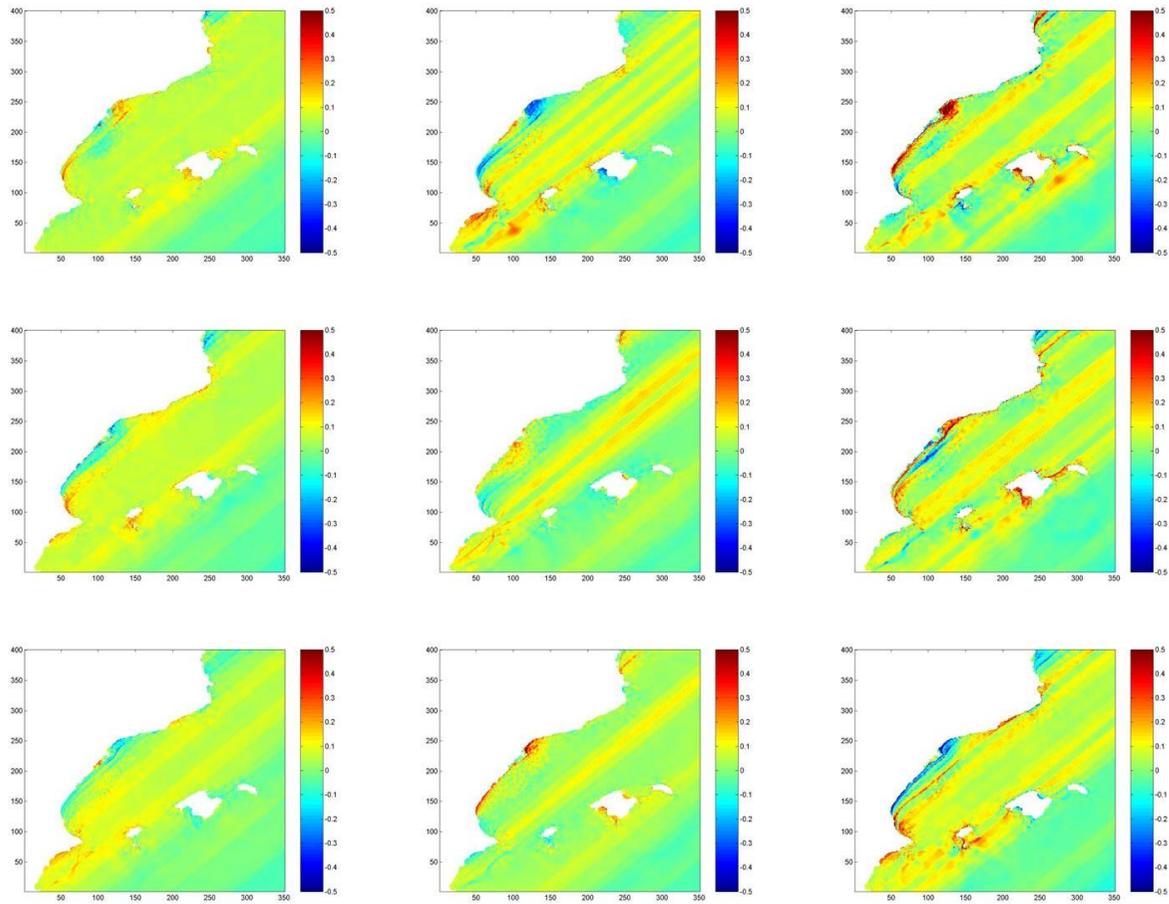
**Figura 10.4** Evolución de la superficie del mar entre  $t=180\text{min}$  y  $t=340\text{min}$  de ejecución. Velocidad de la onda:  $50\text{m/s}$ . Dirección de la onda:  $45^\circ$

---



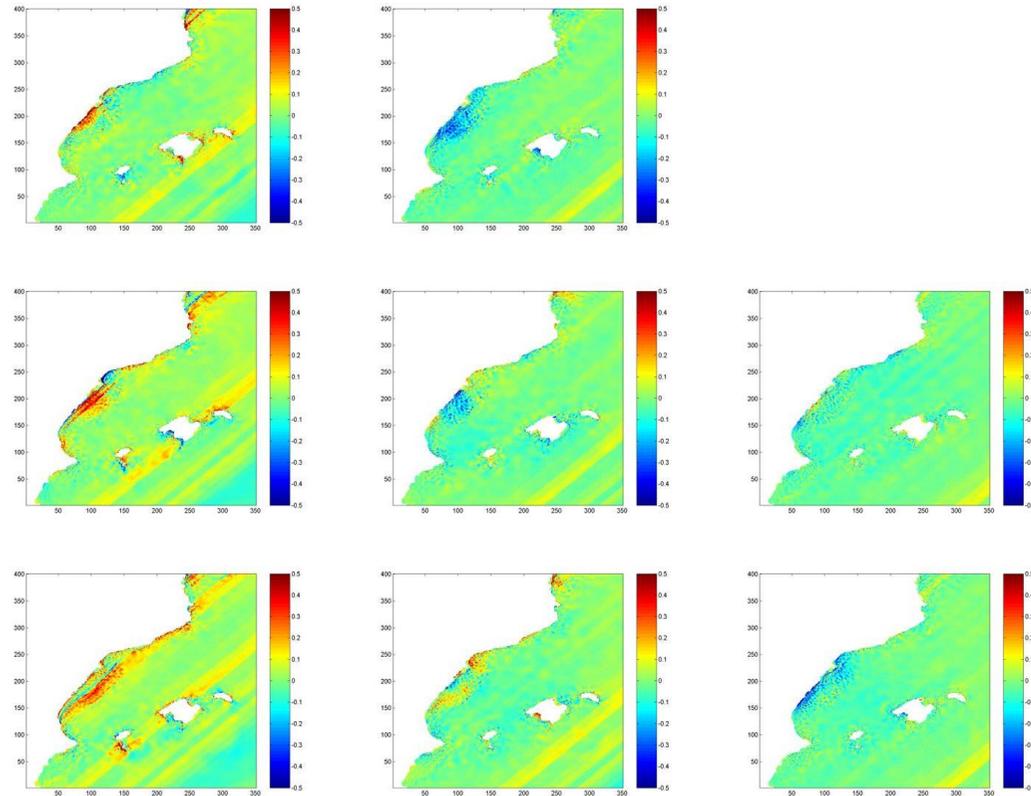
**Figura 10.5** Evolución de la superficie del mar entre  $t=360\text{min}$  y  $t=500\text{min}$  de ejecución. Velocidad de la onda:  $50\text{m/s}$ . Dirección de la onda:  $45^\circ$

---



**Figura 10.6** Evolución de la superficie del mar entre  $t=180\text{min}$  y  $t=340\text{min}$  de ejecución. Velocidad de la onda:  $30\text{m/s}$ . Dirección de la onda:  $135^\circ$

---

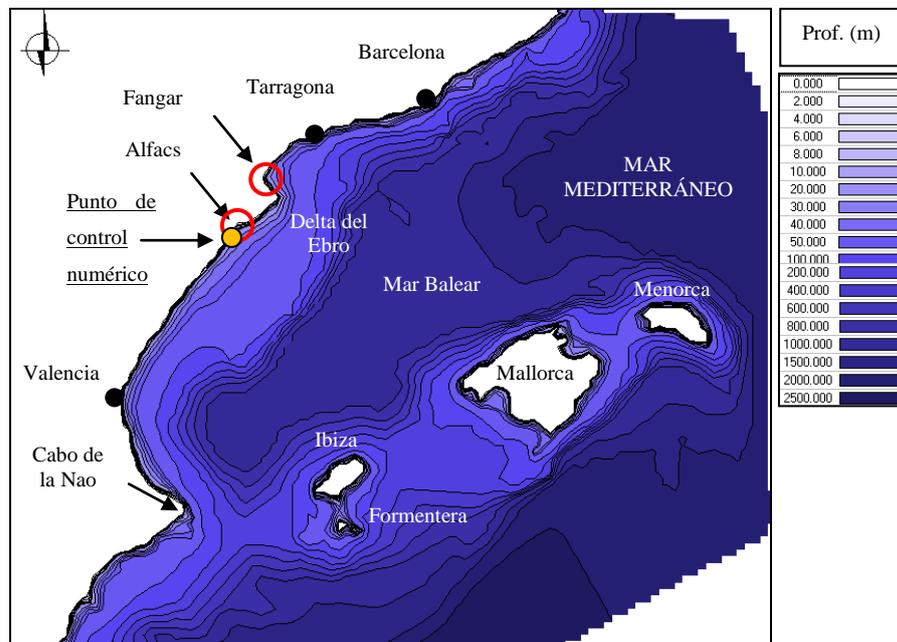


**Figura 10.7** Evolución de la superficie del mar entre  $t=360\text{min}$  y  $t=500\text{min}$  de ejecución. Velocidad de la onda:  $30\text{m/s}$ . Dirección de la onda:  $135^\circ$

---

- **Influencia de la velocidad de propagación de la onda de presión atmosférica en la generación de las ondas de borde**

Una vez hecha la modelación numérica de todos los casos de análisis, es posible extraer información que permita construir la evolución temporal de la superficie libre en cualquier punto del dominio. En la siguiente figura se presenta la localización del punto donde se obtuvieron los resultados.



**Figura 10.8 Localización del punto de análisis**

En las figuras siguientes (10.8 y 10.9) se presenta la variación de la amplitud de la onda en el punto de interés para diferentes velocidades y periodos de la onda de presión atmosférica. Como se ha dicho, el modelo numérico se ha alimentado con la serie temporal de presión atmosférica mostrada en la figura 10.3 y con diferentes velocidades de propagación de esta serie. En cada uno de los puntos de análisis (Figura 10.7) se ha construido el espectro de

---

frecuencias generados en la superficie marina y, a partir de éste se han obtenido las amplitudes de la onda de borde en plataforma de los diferentes períodos de interés, aquellos que coinciden con los modos propios de oscilación de la plataforma continental entre Valencia y Tarragona, y de las bahías de Alfacs y Fangar:  $\sim 3.3$  h,  $\sim 1.5$  h,  $\sim 0.5$  h.

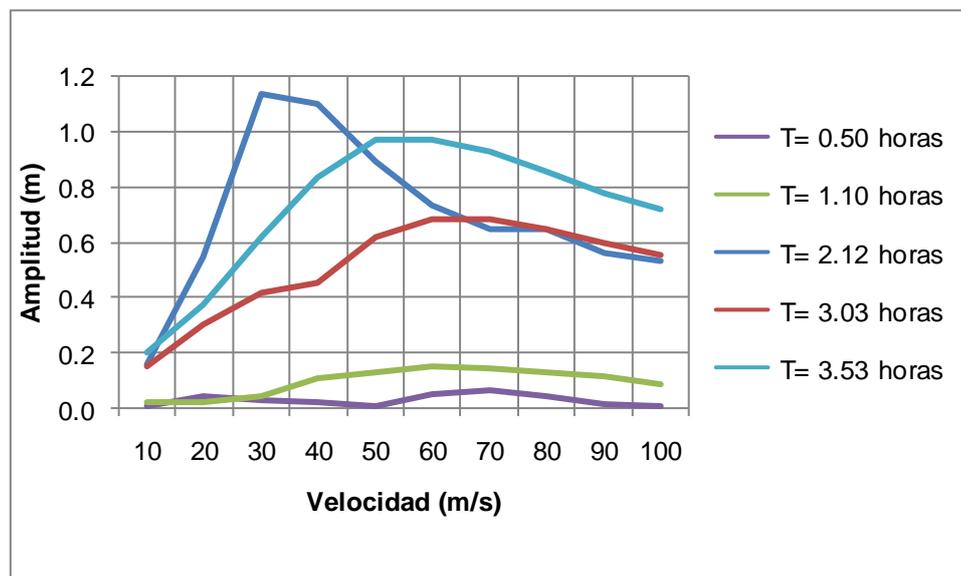
La figura 10.9 muestra la variación de la amplitud de la onda de borde en la bocana de Alfacs en función de la velocidad de propagación de la onda de presión atmosférica, considerando una dirección de propagación de esta última de  $45^\circ$  (paralela al eje longitudinal de la plataforma continental). Los resultados se presentan para cada una de las frecuencias resonantes identificadas en los capítulos 4 y 9. En la figura 10.10 se presenta la misma gráfica para una dirección de propagación de la onda de presión atmosférica igual a  $135^\circ$ .

En ambas figuras se alcanza a ver que la amplitud se comporta en forma de “campana”, es decir, la amplitud máxima se alcanza a una velocidad tal que coincide con la calculada teóricamente, en torno a 25-50 m/s. Esta forma de campana se puede explicar de la siguiente manera: Si la onda de presión es lenta, la superficie del agua alcanza a “acomodarse” también lentamente; por el contrario, si la onda de presión viaja a una gran velocidad, la superficie del agua no “siente” el paso de la misma. Debe existir, entre esos dos extremos, una velocidad a la cual la onda de presión atmosférica genere la mayor perturbación sobre el mar. Esto ocurre a las velocidades encontradas: 25-50 m/s según la longitud sobre la cual se genere la onda de borde, o lo que es lo mismo, según sea la dirección de incidencia a la plataforma, paralela o perpendicular.

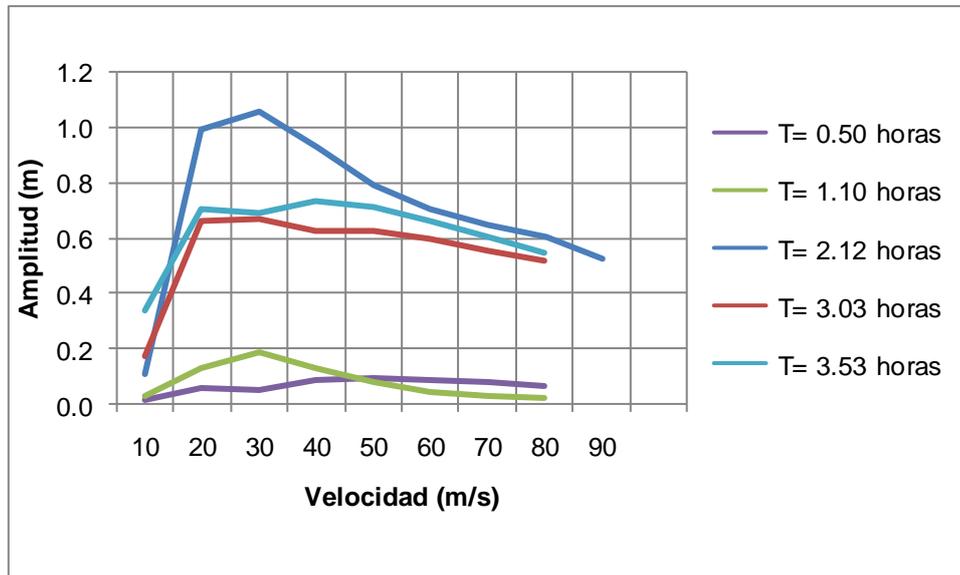
Como era de esperarse, las mayores amplitudes se obtienen cuando se generan ondas en la superficie del mar cuyo período es de 3.03 h y 3.53 h, coincidentes con los períodos propios de oscilación tanto de las bahías, Alfacs y Fangar, como de la plataforma continental en la cual están emplazadas. Estas máximas amplitudes se observan cuando la velocidad de la onda de presión es de  $50 \text{ m/s} \pm 10 \text{ m/s}$  para el caso de incidencia  $45^\circ$  y de  $25 \text{ m/s} \pm 10 \text{ m/s}$  para el caso de incidencia de  $135^\circ$ .

En todos los casos, la amplitud máxima no supera en la bocana de Alfacs un valor de 1.0 m/s. Si se hace caso de los coeficientes de amplificación, que se encontraron y se presentaron en el Capítulo 5 (del orden de 30 sin considerar la fricción en el fondo y los contornos, los que podrían implicar valores de 3.0 en el caso de que se modele con la

fricción real), estas amplitudes podrían ser muy importantes, y de hecho lo son, en el momento en el que se sobre amplifican por resonancia en cualquiera de las dos bahías del delta del Ebro, Alfacs y Fangar.



**Figura 10.9** Variación de la amplitud de la onda de borde en función de la velocidad de la onda de presión atmosférica para una dirección de incidencia de  $45^\circ$



**Figura 10.10 Variación de la amplitud de la onda de borde en función de la velocidad de la onda de presión atmosférica para una dirección de incidencia de  $135^\circ$**

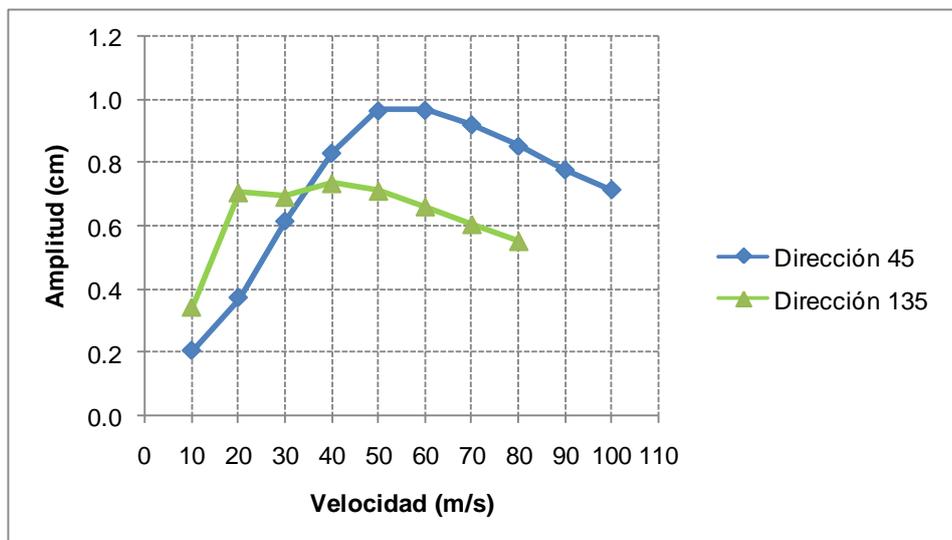
- **Influencia de la dirección de la onda de presión atmosférica en la generación de las ondas de borde**

La figura 10.3 muestra la serie de tiempo de presión atmosférica con la que se alimentó el modelo numérico. Según las hipótesis planteadas, la respuesta de la superficie del agua es diferente según la velocidad y dirección de propagación de la misma. Es por esto que se excitó el modelo con los diferentes casos listados en la tabla 10.1. En el apartado anterior se describió la influencia de la velocidad de la onda de presión en la respuesta resonante de la plataforma continental entre Valencia y Tarragona. En este apartado se evalúa la influencia de la dirección de la misma en la amplificación que se produce justo en la bocana de Alfacs y Fangar.

La dirección está representada en términos de los grados con respecto a la malla local de propagación:  $45^\circ$  y  $135^\circ$  representan, respectivamente, una propagación paralela y perpendicular al eje de la plataforma continental Valencia-Tarragona. La figura 10.12

muestra los resultados de amplitud de la onda de borde en función de la velocidad de propagación para esas dos diferentes condiciones direccionales.

Los resultados muestran claramente que para  $45^\circ$  de incidencia de la onda de presión (dirección paralela a la costa), la amplitud máxima se produce cuando dicha onda viaja a una velocidad cercana a los 50 m/s, mientras que cuando esa onda incide perpendicularmente al eje longitudinal de la plataforma continental ( $135^\circ$ ) la velocidad de propagación debe ser del orden de 25 m/s para tener las máximas amplitudes. La diferencia entre ambos casos se explica por la evidente diferencia en la longitud de generación de la onda: la longitud de la plataforma continental es de 270 km, mientras que su anchura llega a los 60 km. Eso indica que, para que se alcance a generar la onda en la superficie del mar en una distancia menor, la velocidad de la onda de presión debe ser también menor.



**Figura 10.11 Variación de la amplitud de la onda de borde en función de la velocidad de la onda de presión atmosférica para dos diferentes direcciones de propagación de la misma. Resultados para la onda de borde de  $T = 3.53$  h**

## 10.4 Conclusiones

Se ha verificado que la velocidad y dirección de propagación de la onda de presión atmosférica inciden en la amplificación de la onda de borde en la plataforma continental Valencia-Tarragona. Se ha comprobado, mediante modelación numérica, que son ciertas las hipótesis planteadas para la resonancia de las bahías de Alfacs y Fangar. Es decir: ondas atmosféricas propagándose paralelamente al eje longitudinal de la plataforma continental y a una velocidad de 50 m/s generan ondas de borde con períodos alrededor de ~3.3 h. Estas ondas coinciden con los períodos propios de oscilación de dicha plataforma, así como con los modos principales de las bahías Alfacs y Fangar.

# **11. CONSECUENCIAS** **MORFODINÁMICAS DE LAS** **ONDAS RESONANTES**

## **11.1 Introducción**

Se ha logrado establecer que existen ondas de borde de cierto período que se ven amplificadas bajo la imposición de ciertas condiciones geométricas como las de las bahías de Alfacs y Fangar. En una escala espacial bastante menor, se han establecido relaciones entre ondas de borde y formas en las playas; un ejemplo claro son los *beach-cusps*, pequeñas bahías del orden de 10 m de longitud generadas por ondas de borde (Guza e Inman, 1975). Estas ondas se pueden encontrar en diferentes escalas: ondas resonantes de alta frecuencia originadas por el oleaje incidente (Guza y Davis, 1974), forzadas por grupos de ondas (Schäffer, 1990) y ondas de baja frecuencia de escala oceanográfica (Munk et al., 1956). Sería de esperar, entonces, que la respuesta morfodinámica de las costas se evidenciara

también en diferentes escalas. Sin embargo, la mayoría de las investigaciones en este campo se limitan a la escala de las playas. Incluso, se ha estudiado el papel de las mareas en la formación de los *beach-cusps* (Coco et al., 2004). Una revisión de este tema se puede encontrar en Coco y Murray (2007).

Observando las características morfométricas de las bahías analizadas, Alfacs y Fangar, así como la composición no cohesiva de sus suelos, es necesario determinar si estas geoformas se generaron o mantienen estas dimensiones por la existencia de las ondas de plataforma identificadas.

En este capítulo se presentan los resultados de la comparación entre los períodos resonantes de la plataforma continental y los períodos resonantes de zonas semicerradas o bahías de diferentes partes del mundo, de tal manera que una relación en ese sentido puede indicar una relación entre la dinámica de plataforma y la morfología de las bahías.

## **11.2 Sitios de análisis**

### ***11.2.1 Localización y descripción general de los sitios de análisis***

A continuación, en las siguientes figuras, se muestra la localización general de los sitios de análisis y un detalle de los mismos. Más adelante, en una tabla resumen, se presentan las características morfométricas más importantes de cada uno de ellos: Longitud de la bahía, Lb; Anchura de la bahía, Ab; Profundidad de la bahía, Pb; Longitud de la plataforma continental, Lp; Anchura de la plataforma continental, Ap; Profundidad máxima de la plataforma continental, Pp; Pendiente transversal de la plataforma continental, Sp.

**Tabla 11.1. Sitios de interés para la comparación entre el período resonante de la plataforma continental y el período resonante de la bahía**

ID	País	Bahía analizada
1	España	Alfacs
2	España	Fangar
3	España	Alcudia
4	España	Palma
5	Francia	Grand Soufre
6	Francia	Golfo de Fos
7	Italia	Sacca di Goro



**Figura 11.1 Localización general de las bahías analizadas**

Imagen tomada de Google Earth

- **Bahías de Alfacs y Fangar, España**

Alfacs y Fangar son, como ya se mencionó, unidades morfológicas del Delta del Ebro, unidad morfológica del mediterráneo español. Al ser elementos del mismo delta, los materiales constitutivos son precisamente producto de la descarga del río que lo forma, es decir, sueltos y no cohesivos. Las profundidades de ambas bahías se encuentran entre 3.5 y 3.0 m en Alfacs y Fangar, respectivamente. Además, la primera tiene una longitud de unos 18 km, mientras que la segunda tiene unos 7 km de distancia desde la bocana hasta el extremo interior. El fondo en las dos geoformas es muy constante, por lo que su forma puede aproximarse a una dársena de forma rectangular con fondo horizontal. Por otra parte, Alfacs se encuentra abierta hacia el SSW, mientras que Fangar hacia el NNE y forman parte de la plataforma continental entre Valencia y Tarragona, que tiene una longitud de 230 km y una anchura media de 40 km, con una profundidad máxima de 150 m. La figura siguiente presenta una localización detallada de estas dos bahías.



**Figura 11.2 Localización de las bahías Alfacs y Fangar, España**

Imagen tomada de Google Earth

- **Bahía de Alcudia, España**

Ubicada en la zona norte de Mallorca, España, la bahía de Alcudia (Figura 11.3) está abierta hacia el NE. Su fondo presenta una alternancia de arena y rocas y granos gruesos calcáreos y una profundidad media de 10 m. Es una bahía con una bocana muy abierta, presentando dimensiones de 17 km de anchura media y 12 km de longitud.

- **Bahía de Palma, España**

Situada en la parte suroccidental de Mallorca, España, la costa de la bahía de Palma (Figura 11.3) alterna playas y zonas rocosas con acantilados. Su batimetría se caracteriza por tener una pendiente suave con profundidades medias de 15 m y máximas que no superan los 30- 60 m. Los sedimentos están constituidos por arenas de composición calcárea y, sobre ellas, se asientan praderas de Posidonia oceánica hasta profundidades de unos 35 m. Al igual que la bahía de Alcudia, la bahía de Palma tiene una bocana muy abierta, esta vez orientada al SW, con las siguientes dimensiones: Longitud = 16 km y anchura = 13 km.

- **Bahía de Grand-Soufre, Francia**

Marsella es la segunda ciudad más poblada del país y es el puerto comercial más importante de Francia y del Mediterráneo, tercero en importancia de Europa tras Róterdam y Amberes, lo que indica el grado de antropización que tiene esta geoforma. La bahía de Marsella, conjuntamente con la bahía de Malmousque, forman la bahía de de Grand-Soufre, tal como se muestra con detalle en la Figura 11.4. En total, la anchura de la bocana suma 16 km y la distancia media desde esta hasta la costa es de 15 km. El calado medio puede llegar a 10 m.

- **Golfo de Fos, Francia**

Port-de-Bouc es una comuna y población de Francia, localizada como la anterior también en el Mediterráneo. Se encuentra ubicada en el golfo de Fos, unos 25 km al WNW de Marsella. La bahía está enclavada en una cuenca formada por el río Ródano (Figura 11.5) y tiene una

profundidad media de 10 m. La anchura de la bocana y la longitud de la bahía coinciden: 10 km.

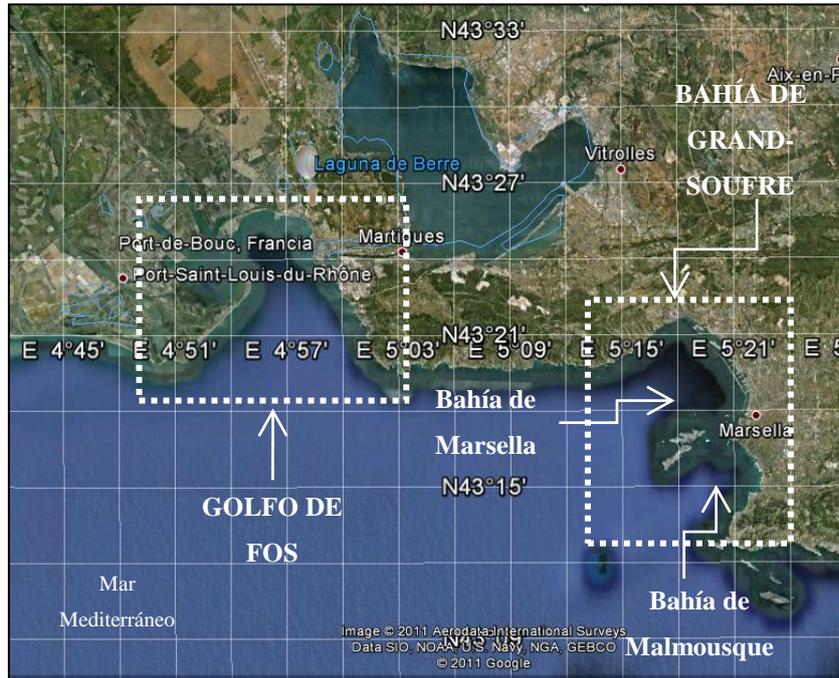
- **Sacca di Goro, Italia**

Es una bahía de aguas someras con profundidades que, en general, no superan los 2 m en bajamar. Está ubicada al Sur del delta del Río Po y tiene una forma triangular de un área aproximada de 26 Km<sup>2</sup>. El área Oeste de la bahía es influenciada por aguas continentales principalmente del Río Po, el área central mayormente influenciada por el mar y la zona Este es la más somera, con profundidades no mayores a 1 m. Está conformada principalmente por sedimentos arenosos del río Po. Tiene una longitud de unos 10 km, mientras que la bocana llega a tener 3 km de anchura.



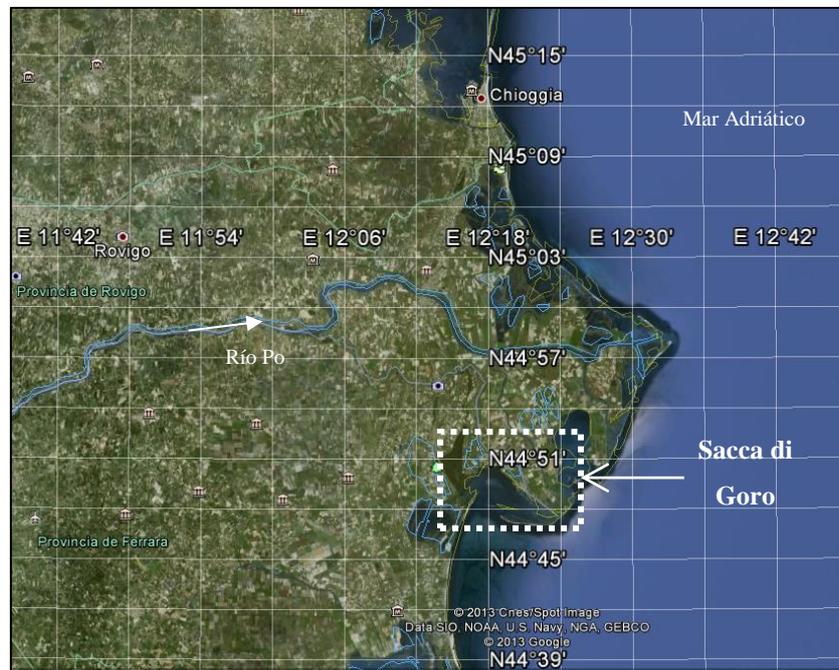
**Figura 11.3 Localización de las bahías Alcudia y Palma (Mallorca), España**

Imagen tomada de Google Earth



**Figura 11.4** Localización de las bahías Grand-Soufre y Golfo de Fos, Francia

Imagen tomada de Google Earth



**Figura 11.5** Localización de Sacca di Goro, Italia

Imagen tomada de Google Earth

### 11.2.2 *Resumen morfométrico de los sitios de análisis*

Las tablas siguientes presentan una caracterización resumida de los parámetros de forma de las bahías descritas en el apartado anterior y de las plataformas continentales donde están localizadas.

**Tabla 11.2. Resumen morfométrico de las bahías de interés**

ID	Bahías analizadas	Longitud (m)	Profundidad media (m)
1	Alfacs	18,000	3.5
2	Fangar	7,000	3
3	Alcudia	12,000	10
4	Palma	16,000	15
5	Grand-Soufre	15,000	10
6	Golfo de Fos	15,000	10
7	Sacca di Goro	10,000	1

**Tabla 11.3. Resumen morfométrico de las plataformas continentales en las que se localizan las bahías de interés**

ID	Bahías analizadas	Longitud (m)	Pendiente media (m/m)
1	Alfacs	230,000	1/270
2	Fangar	230,000	1/270
3	Alcudia	300,000	1/33
4	Palma	300,000	1/33
5	Grand-Soufre	150,000	1/100
6	Golfo de Fos	150,000	1/100
7	Sacca di Goro	1.400.000	1/466

### 11.3 Comparación de los períodos resonantes en las bahías y de la plataforma continental

Como se dijo al principio del presente capítulo, en búsqueda de mostrar la relación existente entre los fenómenos hidrodinámicos de plataforma y la morfología de algunas zonas semicerradas costeras, es posible establecer la relación existente entre los modos propios de oscilación de las bahías y los de las plataformas en las cuales estas se encuentran localizadas.

En el presente apartado se presentan los resultados de la estimación de los modos resonantes de las bahías y la plataforma continental en la que se encuentran emplazadas, haciendo uso de las ecuaciones (4.1) y (9.1).

La tabla 11.4 muestra los modos propios de oscilación de cada una de las plataformas continentales en las cuales se encuentran emplazadas las bahías de interés. Estos resultados se han obtenido mediante la aplicación de la fórmula (9.1), Yanomi y Tsuji (1998).

Los períodos resonantes de las siete bahías analizadas se presentan en la tabla 11.5. Al efecto de un cálculo sencillo, todas ellas pueden suponerse como dársenas rectangulares con fondo plano, de tal manera que la fórmula (4.1) de Merian puede aplicarse para verificar estos resultados.

**Tabla 11.4. Modos propios de oscilación identificados en las plataformas continentales de interés**

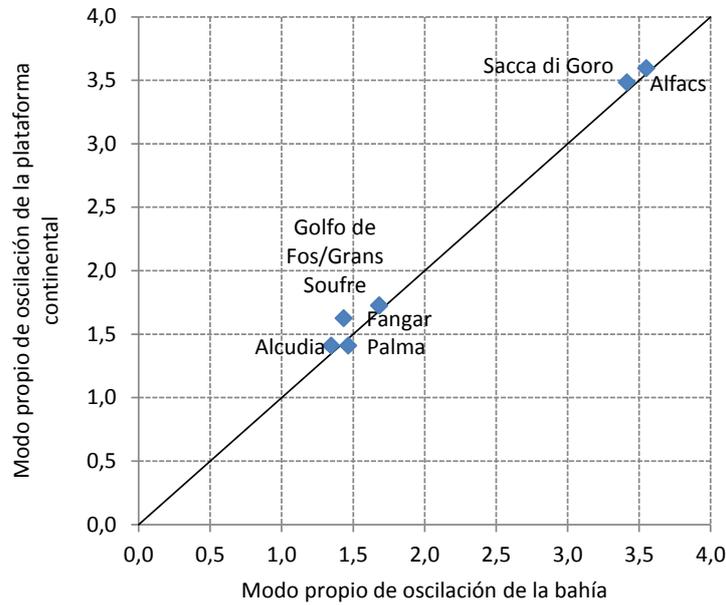
ID	Bahías analizadas	Longitud (m)	Pendiente media (m/m)	Período resonante (h)		
				Modo 0	Modo 1	Modo 2
1	Alfacs	230,000	1/270	3.48	1.16	0.70
2	Fangar	230,000	1/270	3.48	1.16	0.70
3	Alcudia	300,000	1/33	1.41	0.47	0.28
4	Palma	300,000	1/33	1.41	0.47	0.28
5	Grand-Soufre	150,000	1/100	1.72	0.57	0.34
6	Golfo de Fos	150,000	1/100	1.72	0.57	0.34
7	Sacca di Goro	1.400.000	1/466	3,59	1,20	0,72

**Tabla 11.5. Modos propios de oscilación identificados en las bahías de interés**

ID	Bahías analizadas	Longitud (m)	Profundidad media (m)	Período resonante (h)		
				Modo 0	Modo 1	Modo 2
1	Alfacs	18,000	3.5	3.41	1.14	0.68
2	Fangar	7,000	3	1.64	0.55	0.33
3	Alcudia	12,000	10	1.35	0.45	0.27
4	Palma	16,000	15	1.47	0.49	0.29
5	Grand-Soufre	15,000	10	1.68	0.56	0.34
6	Golfo de Fos	15,000	10	1.68	0.56	0.34
7	Sacca di Goro	10.000	1	3,55	1,18	0,71

Evidentemente todas las bahías muestran que su modo principal de oscilación coincide perfectamente con el de la plataforma continental. Fangar, localizada al Este del delta del Ebro parece ser la excepción. No obstante, haciendo un análisis más detallado se puede encontrar una explicación. El tramo de plataforma continental entre el delta del Ebro y Tarragona tiene una longitud de 50 km. Si se hace el mismo cálculo anterior considerando que este tramo, y no el que se encuentra entre Valencia y Tarragona, gobierna la morfología de esta bahía, el modo principal de oscilación de Fangar coincide perfectamente con el del tramo de la plataforma descrito. Esto sugeriría que existen dos mecanismos intermedios de plataforma, u ondas de borde, actuando sobre dicha plataforma. Uno actuando entre Valencia y Tarragona y otro entre el Delta del Ebro y Tarragona.

La figura siguiente presenta la comparación de los períodos propios de oscilación de las plataformas continentales y de las bahías que en ellas se encuentran. Se ha representado también la línea de 45° que representa una relación perfecta entre unos y otros. El hecho de que todos los puntos se encuentren tan cerca de esta línea es un indicador de la similitud mencionada.



**Figura 11.6 Comparación del modo propio de oscilación de las bahías analizadas y de la plataforma continental en la que se encuentran emplazadas**

## 11.4 Conclusiones

Los resultados de este capítulo muestran que existe una coincidencia entre el modo propio de oscilación de ciertas plataformas continentales y el de las bahías que están localizadas en ellas. Esa pura coincidencia parece indicar, más bien, que el período resonante de esas zonas semicerradas está relacionado con el período resonante exterior, lo que hace concluir que probablemente la forma de las bahías esté siendo condicionada por la hidrodinámica de las ondas de borde que existen en la plataforma continental.

## **12. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN**

### **12.1 Conclusiones**

Las conclusiones obtenidas en el desarrollo de esta tesis se presentan a continuación

- Mediante observación directa, se han encontrado picos resonantes en las bahías de Alfacs y Fangar, específicamente en los mareógrafos de San Carles de la Ràpita y l’Ampolla. Ondas en los períodos de ~3.3 h, ~1.5 h, ~1.1 h, ~0.7 h y ~0.5 h no son normales dentro del espectro de marea astronómica del Mediterráneo. La respuesta resonante de Alfacs ante la onda de ~3.3 h se observa durante todo el año, aunque con períodos de mayor energía (DEF, MAM). Las ondas con períodos de ~1.1 h y ~0.5 h son de menor energía que la de T~3.3 h en Alfacs pero de mayor energía en Fangar; la respuesta resonante de ambas bahías ante estas ondas parece ser esporádica, aunque con una frecuencia de ocurrencia de entre 4 y 10 días.

- Se ha verificado la relación de estas ondas con la geometría de las bahías. Según la modelación numérica lineal realizada en las bahías de Alfacs y Fangar, los picos extraordinarios observados en los espectros de energía de los datos de nivel del mar registrados en los mareógrafos de las dos bahías ( $T \sim 3.3$  h,  $T \sim 1.5$  h,  $T \sim 1.1$  h,  $T \sim 0.7$  h y  $T \sim 0.5$  h) corresponden con diferentes períodos resonantes de las bahías según el nivel de referencia (bajamar, media marea o pleamar).
- Se ha demostrado que ni la velocidad del viento, ni la dirección del mismo coinciden temporalmente o en magnitud con el registro de los eventos resonantes en ambas bahías. Los resultados encontrados sobre la influencia de la velocidad del viento en la amplificación resonante de las bahías de Alfacs y Fangar en las frecuencias de 3.3 h, 1.1 h y 0.5 h no han sido satisfactorios. La dirección del viento en el mismo sentido que el eje de las bahías parece que no es el mecanismo forzador de las *seiches* observadas. En relación con esto último, no existe dependencia temporal entre esa dirección y la ocurrencia de la sobreamplificación.
- Se ha demostrado, mediante el análisis de los espectros de coherencia de las dos señales, que existe una fuerte relación entre las señales de presión atmosférica y nivel del mar en las frecuencias resonantes de Alfacs y Fangar.
- Se ha descartado la relación entre la resonancia en las bahías de análisis (Alfacs y Fangar) y el WeMOi, por cuanto la localización de los centros de presión no está vinculada directamente a la magnitud de los eventos observados.
- Se ha logrado demostrar que la presión atmosférica influye en los eventos resonantes de Alfacs y Fangar. En particular, la dirección de la onda de presión atmosférica está directamente relacionada con los eventos más energéticos. Cuando el campo de presión atmosférica se desplaza de forma paralela al eje de la plataforma continental entre Valencia y Barcelona, esta energía es mayor. Por el contrario, cuando esta dirección es perpendicular al eje de dicha plataforma, se generan los menores niveles de energía en los registros de nivel del mar de San Carles de la Rápita y l'Ampolla en las frecuencias resonantes.
- Mediante modelación numérica se ha comprobado que existen unas ondas de borde en la plataforma continental entre Valencia y Barcelona de frecuencia igual ( $\sim 3.3$  h,  $\sim 1.1$  h y  $\sim 0.5$  h) a la de los modos propios de oscilación de las bahías de Alfacs y Fangar. Se observan también frecuencias en  $\sim 1.5$  h y  $\sim 0.7$  h, coincidiendo con otros

modos identificados en estos sitios. Estos resultados también se observan en los registros de nivel del mar de Valencia. En los registros de nivel del mar en Barcelona, por el contrario, no se notan estos picos resonantes en los modos identificados, lo que permite concluir que, en efecto, el fenómeno observado en Alfacs y Fangar es de una génesis regional asociado a las características geométricas de la plataforma continental entre Valencia y Barcelona. En estas dos bahías se observa, simplemente, una amplificación resonante de esas ondas observadas en la plataforma.

- Se ha verificado que la velocidad y dirección de propagación de la onda de presión atmosférica inciden en la amplificación de la onda de borde en la plataforma continental Valencia-Tarragona. Se ha comprobado, mediante modelación numérica, que ondas atmosféricas propagándose paralelamente al eje longitudinal de la plataforma continental y a una velocidad de 50 m/s generan ondas de borde con períodos alrededor de ~3.3 h. Estas ondas coinciden con los períodos propios de oscilación de dicha plataforma, así como con los modos principales de las bahías Alfacs y Fangar.
- Se ha evidenciado que existe una coincidencia entre el modo propio de oscilación de ciertas plataformas continentales y el de las bahías que están localizadas en ellas. Esa pura coincidencia parece indicar, más bien, que el período resonante de esas zonas semicerradas está relacionado con el período resonante exterior, lo que hace concluir que probablemente la forma de las bahías esté siendo condicionada por la hidrodinámica de las ondas de borde que existen en la plataforma continental.

## **12.2 Futuras líneas de investigación**

Las conclusiones de esta tesis son precisas para las bahías de Alfacs y Fangar, en el delta del Ebro. En el último capítulo se planteó, y se demostró someramente, la posibilidad de que otras bahías del Mediterráneo podían estar siendo influenciadas por las ondas de borde que existirían en las plataformas continentales donde se ubican. En ese sentido, y sabiendo que el

---

fenómeno es de tipo regional pero con amplificaciones locales, será conveniente la investigación en los siguientes puntos:

- Identificación de fenómenos resonantes en diferentes bahías del mundo. Para ello será necesario analizar los registros de nivel del mar en cada una de ellas. Buscar bahías en las que se cuente con registros de nivel con frecuencia de captura de datos de menos de 10 minutos sería ideal.
- Determinación de los mecanismos forzadores de los fenómenos resonantes, mediante el análisis de coherencia de series entre las diferentes variables de interés. Se debería hacer énfasis en aquellas zonas donde se evidencie un mecanismo intermedio entre la variable atmosférica y el nivel del mar.
- Demostración de la importancia de las ondas de borde en la morfología de las bahías de la plataforma donde se generan.

## **BIBLIOGRAFÍA**

Agudelo, P., Marcos, M., Medina, R., Lomónaco, P., Monserrat, S., Vidal, C. (2005a) "Régimen de oscilación de "rissagas" en la ensenada de Ciudadela, Menorca". *VIII Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos*. Sitges, España.

Agudelo, P., Marcos, M., Lomónaco, P., Monserrat, S., Medina, R. (2005b). "Evaluation of Seiche regimes in Ciutadella Cove, Menorca (Spain)". *Fifth International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis - WAVES 2005*. Madrid, España.

As-Salek, Junaid A., David J. Schwab. (2004). "High-Frequency Water Level Fluctuations in Lake Michigan". *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, **130**:1, 45.

Bell, G. D., and co-authors. (2000). "Climate Assessment for 1999". *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 81, S1-S50.

Berkhoff, J. C. W. (1972). "Computation of Combined Refraction-Diffraction." *Proc. 13th Int. Conference Coastal Engineering, ASCE*, 2, Vancouver (Canada), pp 471-490.

Bormans, M. and C. Garrett. (1989). "The effects of nonrectangular cross-section, friction and barotropic fluctuations on the exchange through the Strait of Gibraltar". *J. Phys. Oceanogr.*, 19, 1543-1557.

Bowers, E. C. (1988). "Wave grouping and harbour design." *Proc. Inst. Civil Eng.*, 85(2), pp 227-258.

Buchwald, V.T., and R.A. de Soeke. (1973). "The response of a continental shelf to travelling pressure disturbances". *Aust. J. Mar. Freshwater Res.*, 24, 143-158.

Camp, J. (1995). "Aproximaciones a la dinámica ecológica de una bahía estuárica mediterránea". Reporte de Proyectos CAICYT PAC-CO16-CO2 y CICYT MAR 89-0556. Institut de Ciències del Mar, CSIC.

Camus, P. (2009). "Metodologías para la definición del clima marítimo en aguas profundas y someras. Aplicaciones en el corto, medio y largo plazo". *Tesis doctoral*. Universidad de Cantabria.

Capel-Molina, J.J. (2000). "El Clima de la Península Ibérica". Ed. Ariel, Barcelona.

Chamberlain, P. G., & Porter, D. (1995). "The modified mild-slope equation." *J. Fluid Mech.*, 291, pp 393-407. Chen and Liu, 1995.

Chen, H.S. & Mei, C.C. (1974). "Oscillations and Wave Forces in a Man-Made Harbor in the Open Sea", *Proceedings 10th Naval Hydrodynamics Symposium*, June 24-28, pp. 573-596.

Coco, G., Werner, B.T., Burnet, T., and Elgar, S. (2004). "The role of tides in beach cusp formation". *Journal of Geophysical Research*, 109, CO4011, doi: 10.1029/2003JC002154.

Coco, G., and Murray, A.B. (2007). "Patterns in the sand: from forcing templates to self-organization". *Geomorphology*, 91(3-4), 271-290.

Correggiari, A., Trincardi, F., Langone, L., Roveri, M. (2001). "Styles of failure in heavily sedimented highstand prodelta wedges on the Adriatic shelf". *J. Sediment. Res.* 71, 218 – 236.

De Girolamo, P. (1996). "An experiment on harbour resonance induced by incident regular waves and irregular short waves." *Coastal Engineering*, 27(1-2), pp 47-66.

Dean, R.G. and R.A. Dalrymple. (1991). "Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists". World Scientific. pp 157-158.

Díaz, G. (2006). "Análisis de resonancia portuaria: generación, transitoriedad no linealidad y acoplamiento geométrico". *Tesis doctoral*. Universidad de Cantabria.

Dingemans, M. W. (1973). "Water waves over an uneven bottom; a discussion of long-wave equations". *Delft Hydraulics Rep. R729*, part 2. pp 57-70.

Donn, W. L. and Balachandran, N. K. (1964). "Coupling between a moving air-pressure disturbance and the sea surface". *Tellus* 21, pp 701–706.

Fontseré, E. (1934), "Les "seixes" de la costa catalana". Servei Meteorològic de Catalunya. Notes d'Estudi N°58.

Garcies, M., Gomis, D., & Monserrat, S. (1996). "Pressure-forced seiches of large amplitude in inlets of the Balearic Islands 2. Observational study." *Journal of Geophysical Research*, 101(C3), pp 6453-6468

Garrett, C., Akerly, J. And Thompson, K. (1989). "Low-frequency fluctuations in the Strait of Gibraltar from MEDALPEX sea level data". *Journal of Physical Oceanography*, 19 (11), 1682-1696.

Gierlevsen, T., M. Hebsgaard and J. Kirkegaard. (2001). "Wave Disturbance Modelling in the Port of Sines, Portugal – with special emphasis on long period oscillations". *International Conference on Port and Maritime R&D and Technology*, Singapore, 29-31 October 2001.

Giese, G.S., Chapman, D.C., Black, P.G., Fornshell, J.A. (1990). "Causation of large-amplitude coastal seiches on the Caribbean coast of Puerto Rico". *Journal of Physical Oceanography*, 20, 1449-1458.

GIOC. (1999). "Desarrollo de un modelo de agitación basado en las ecuaciones elípticas de la pendiente suave en un esquema de elementos finitos." *Informe técnico, Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas, Universidad de Cantabria.*

GIOC. (2004). "Asistencia técnica para la redacción del proyecto del dique exterior y de la dársena de Cala N'Bousquets del puerto de Ciutadella." *Anejo2. Agitación debida a rissagues, GIOC. Fundación Leonardo Torres Quevedo, SENER, Europrincipia.*

GIOC, U. d. C. (2001). "Desarrollo de un modelo de propagación de oleaje y agitación portuaria de última generación cuyos derechos de explotación estén bajo control español. 1er Informe anual." *Universidad de Cantabria, Cornell University, CEDEX, Puertos del Estado, Dirección General de Costas, Ports de la Generalitat, AZTI-SIO, ALATEC, INHA. HIDTMA, INERINSA, INTECSA y SENER, Enero 2001.*

GIOC, U. d. C. (2003). "Desarrollo de un modelo de propagación de oleaje y agitación portuaria de última generación cuyos derechos de explotación estén bajo control español. 2er Informe anual " *Universidad de Cantabria, Cornell University, CEDEX, Puertos del Estado, Dirección General de Costas, Ports de la Generalitat, AZTI-SIO, ALATEC, INHA. HIDTMA, INERINSA, INTECSA y SENER.*

Gobbi, M. F., & Kirby, J. T. (1999). "Wave evolution over submerged sills: Tests of a high-order Boussinesq model." *Coastal Engineering*, 37, pp 57-96. Gomis et al. (1993).

Gomis, D., Monserrat, S., & Tintoré, J. (1993). "Pressure-forced seiches of large amplitude in inlets of the Balearic Islands." *Journal of Geophysical Research*, 98(C8), pp 14437-14446.

Goupillaud, P., Grossmann, A., Morlet, J. (1984). "Cycle - Octave and Related Transforms in Seismic Signal Analysis". *Geoexploration*, 23, 85 – 10.

Guza, R. T., & Davis, R. E. (1974): "Excitation of edge waves by waves incident on a beach", *J. Geophys. Res.*, 79, pp. 1285-1291.

Guza, R., & Inman, D. (1975). "Edge Waves and Beach Cusps". *Journal of Geophysical Research*, 80(21), 2997-3012.

Hastie, T., R. Tibshirani y J. Friedman (2001). "The Elements of Statistical Learning". Springer, New York.

Hibiya, T. and Kajiura, K. (1982) "Origin of the Abiki phenomenon (a kind of seiche) in Nagasaki Bay". *Journal of the Oceanographical Society of Japan*. pp 172–182.

Hodzic, M. (1979). "Exceptional oscillations in the Bay of Vela Luka and meteorological situation on the Adriatic". *International School of Meteorology of the Mediterranean, 1 Course, Erice, Italy*. pp 90-110.

Houston, J. R., and Garcia, A. W. (1978) "Type 16 Flood Insurance Study: Tsunami Predictions for the West Coast of the Continental United States". *U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station Technical Report*. pp 78-26.

Hwang, L.S. and Tuck, E.O. (1970). "On the oscillations of harbors of arbitrary shape". *J. Fluid Mech.*, 42.

Ippen, A. T., and Goda, Y. (1963). "Wave-induced oscillations in harbours: the solution for a rectangular harbour connected to the open sea". *Hydrodynamics Lab. M. I. T. T. R.* pp 48-59.

Jansá, A., Monserrat, S., and Gomis, D. (2007). "The rissaga of 15 June 2006 in Ciutadella (Menorca), a meteorological tsunami". *Advances in Geosciences*. 12: 1-4.

Jong M. P. C. de, L. H. Holthuijsen, and J. A. Battje. (2003). "Generation of seiches by cold fronts over the southern North Sea". *Journal of Geophysical Research*, Vol. 108. pp 10-25.

Jorba, O., S. Gassó, y J.M. Baldasano. (2004). "Regional circulations within the Iberian Peninsula east coast". *Proc. Air Pollution Modeling and Its Application XVI*. Eds. Borrego & Incecik, Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, 453-461.

Kerr, R. A. (2005). "Atlantic climate pacemaker for millennia past, decades hence?". *Science*. 309 (5731): 41–43.

Kirby, J. T., & Dalrymple, R. A. (1994). "Combined Refraction/Diffraction Model REF/DIF 1, Version 2.5. Documentation and User's Manual." *Research Report No. CACR-94-22*,

*Center for Applied Coastal Research, Department of Civil Engineering, University of Delaware, Newark.*

Kofoed-Hansen, H., Sloth, P., Sorensen, O., & Fuchs, J. (2000). " Combined Numerical and Physical Modelling of Seiching in Exposed New Marina." *Coastal Engineering*, pp 3600-3614

Kravtchenko, J., & McNown, J. S. (1955). "Wave-induced oscillations in harbours: the solution for a rectangular harbour connected to the open sea." *Quart. Appl. Math.*, 13, pp 19-26

l'Homer, A., Bazile, F., Thommeret, J. & Thommeret, Y. (1981). "Principales étapes de l'édification du delta du Rhone de 7000 BP à nos jours, variations du niveau marin". *Oceanis*. 7: 389-408.

Larnicol G., P.Y. Le Traon, P. De Mey. (1995). "Mean sea level and surface circulation variability of the Mediterranean sea from 2 years of TOPEX/POSEIDON altimetry". *J. Geophys. Res.*, 100, 25, 163-25, 177.

Lee, J.-J. (1971). "Wave-induced oscillations in harbours of arbitrary shape." *J. Fluid Mechanics*, 45, part 2, pp 375-394.

Leendertse, J. J. (1967). "Aspects of a computational model of long period water wave propagation." *Memo RM-5294-PR, The Rand Corporation*, May 1967.

Lemon, D.D., P.H. LeBlond, and T.R. Osborn. (1979). "Seiche excitation in Port San Juan, British Columbia". *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*. 36(10):1223-1227.

Lepelletier, T. G. (1980). "Tsunamis - Harbor oscillations induced by nonlinear transient long waves." *PhD thesis, W. M. Keck Laboratory of Hydraulics and Water Resources, Division of Engineering and Applied Science*, pp 505

LeVeque, R. (1998). "Balancing Source Terms and Flux Gradients in High-Resolution Godunov Methods: The Quasi-Steady Wave-Propagation Algorithm". *J. Comput. Phys.*, 146 (1998) 346-365.

- 
- Li, Y. S., Liu, S.-X., Yu, Y.-X., & Lai, G.-Z. (1999). "Numerical modeling of Boussinesq equations by finite element method." *Coastal Engineering*, 37(2), pp 97-122(26).
- Liu, P. C. (2000). "Wavelet transform and new perspective on coastal and oceanic engineering data analysis". *Advances on Coastal and Ocean Engineering*, 6, pp 57-101.
- Liu, P.-F. L., & Mei, C. C. (1976). "Water motion on a beach in the presence of a breakwater 1. Waves". *Journal of Geophysical Research*, 81(C18), pp 3079-3084.
- Liu, P. L.-F., & Iskandarini, M. (1991). "Scattering of wave groups by submerged horizontal plate". *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng*, 117, pp 235-246.
- Liu, P. L.-F. (1994). "Model equations for wave propagations from deep to shallow water". *Advances in coastal and ocean engineering*, 1, pp 125–157.
- Liu, P.-F. L., & Losada, I. J. (2002). "Wave Propagation Modeling in Coastal Engineering". *Journal of Hydraulic Research*, 40, pp 229.
- Liu, P.-F. L., Monserrat, S., & Marcos, M. (2002). "Analytical simulation of edge waves observed around the Balearic Islands". *Geophysical Research Letters*, 29(17), pp 28.1-28.4.
- Liu, P. L.-F., Monserrat, S., Marcos, M., & Rabinovich, A. B. (2003). "Coupling between two inlets: Observation and modeling". *J. Geophys. Res.*, 108 (C3), pp 369.
- Liu, P. L., Monserrat, F., S. , Marcos, M., & Rabinovich, A. B. (2004). "Coupling between two inlets: Observation and modeling". *J. Geophys. Res.*, 109 (C03011).
- Longuet-Higgins, M. S., & Stewart, R. W. (1962). "Radiation stress and mass transport in gravity waves, with application to "surf beats"." *J. Fluid Mech.*, 13, pp 481-562.
- Loomis, H. G. (1972). "A package program for time-stepping long waves into coastal regions with application to haleiwa harbor, Oahu." *HIG-72-21, Technical Report, Hawaii Institute of Geophysics, University of Hawaii*, October 1972.
-

Lopez-Bustins, J.A. (2007). "The Western Mediterranean Oscillation and Rainfall in the Catalan Countries". PhD Thesis, Department of Physical Geography and Regional Geographical Analysis, University of Barcelona, Catalonia, 184 pp.

Luettich, R.A., Jr., J.E., McNinch, H.W. Paerl, C.H. Peterson, J.T. Wells, M. Alperin, C.S. Martens, and J.L. Pinckney (2000). "Neuse River Estuary modeling and monitoring project stage 1: hydrography and circulation, water column nutrients and productivity, sedimentary processes and benthic-pelagic coupling", *Report UNC-WRRI-2000-325B, Water Resources Research Institute of the University of North Carolina*, Raleigh, NC, 172p

Luettich, R.A., Jr., S.D. Carr, J.V. Reynold-Fleming, C.W. Fulcher and J.E. McNinch. (2002). "Semidiurnal seiching in a shallow, microtidal lagoonal estuary". *Continental Shelf Research*, 22: 1669-1681

Madsen, O. S., & Mei, C. C. (1969). "The transformation of a solitary wave over an uneven bottom." *J. Fluid Mech.*, 39, pp 781-791.

Madsen, P. A., Banijamali, B., Schaoffer, H. A., & Sørensen, O. R. (1996). "Boussinesq Type Equations with High Accuracy in Dispersion and Nonlinearity." *Coastal Engineering*, pp 95-108.

Madsen, P. A., Murray, R., & Sørensen, O. R. (1991). "A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics. Part 1." *Coastal Engineering*, 15, pp 371-388.

Madsen, P. A., & Schäffer, H. A. (1999). "A review of Boussinesq-type equations for gravity waves." In *Advances in Coastal and Ocean Engineering*, World Scientific, 5, pp 1-95.

Madsen, P. A., & Sørensen, O. R. (1992). "A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics. Part 2: A slowly varying bathymetry. ." *Coastal Engineering*, 18, pp 183-204.

Madsen, P. A., Banijamali, B., Schäffer, H. A. & Sørensen, O. R. (1996). "Boussinesq type equations with high accuracy in dispersion and nonlinearity". *Proc. 25th Intl Conf. Coastal Engng* (ed. B. Edge), vol. 1, pp. 95-108. ASCE.

---

Madsen, P. A., Sørensen, O. R., & Schäffer, H. A. (1997a). "Surf zone dynamics simulated by a Boussinesq type model. Part I. Model description and cross-shore motion of regular waves." *Coastal Engineering*, 32, pp 255-287(33).

Marcos, M., Monserrat, S., Medina, R., Orfila, A., Olabarrieta, M., (2009). "External forcing of meteorological tsunamis at the coast of the Balearic Islands". *Physics and Chemistry of the Earth*, 34(17-18): 938-947.

Marcos, M., Liu, P. L.-F., & Monserrat, S. (2004). "Nonlinear resonant coupling between two adjacent bays." *J. Geophys. Res.*, 109, pp C05008.

Marcos, M., S. Monserrat, R. Medina, and C. Vidal, 2001. Influence of the atmospheric wave velocity in the coastal amplification of meteotsunamis, Underwater ground failures on tsunami generation, modelling, risk and mitigation. NATO Science Series, Kluwer, pp 30-45.

Martín Vide, J. y Olcina Cantos, J. (1996). "Tiempos y climas mundiales. Climatología a través de mapas del tiempo e imágenes de satélite". Barcelona, Oikos-Tau.

Massel, S. R. (1993). "Extended refraction–diffraction equation for surface waves." *Coastal Engineering*, 19, pp 97-126.

Massel, S.R. (2001). "Wavelet analysis for processing of ocean surface wave records". *Ocean Engineering*, 28, 957–987.

McNown, J. S. 1952. "Waves and seiche in idealized ports". *Gravity waves symposium* (521), pp 153-164.

M. Menéndez, A. Tomás, P. Camus, M. García-Díez, L. Fita, J. Fernández, F.J. Méndez, I.J. Losada. (2011). "A methodology to evaluate regional-scale offshore wind energy resources2. *OCEANS '11 IEEE*, Spain.

Merrifield, M.A., Yang, L. and Luther, D.S. (2002). "Numerical simulations of a storm-generated island-trapped wave event at the Hawaiian Islands". *Journal of Geophysical Research*. 107. doi: 10.1029/2001JC001134. issn: 0148-0227.

Meyers, S. D., B. G. Kelly, and J. J. O'Brien (1993). "An introduction to wavelet analysis in oceanography and meteorology: With application to the dispersion of Yanai waves". *Mon. Wea. Rev.*, 121, 2858–2866.

Miles, J. and Munk, W. (1961). "Harbor paradox". *J. Waterways Harbor Division, ASCE*, 87, pp 111–130.

Molinet Coll, V. (2006). "Recuperación del delta del Ebro I. Recuperación de la configuración del delta del Ebro". Tesina de licenciatura. Universidad Politécnica de Cataluña. 104 páginas.

Monserrat, S., Ramis, C., and Thorpe, A. J. (1991a). "Large amplitude pressure oscillations in the Western Mediterranean", *Geophys. Res. Lett.*, 18, pp183–186.

Monserrat, Ibbetson, S. A., & Thorpe, A. J. (1991b). "Atmospheric gravity waves and the 'Rissaga' phenomenon." *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 117(499), pp 553-570(18).

Monserrat, S. and Thorpe, A. J. (1992). "Gravity-wave observations using an array of microbarographs in the Balearic Islands", *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, pp 259–282.

Monserrat, S., A.B. Rabinovich, B. Casas (1998). "On the Reconstruction of the Transfer Function for Atmospherically Generated Seiches". *Geophys. Res.* pp 2197-2205.

Monserrat, S., Vilibić, I., and Rabinovich, A. B. (2006). "Meteotsunamis: atmospherically induced destructive ocean waves in the tsunami frequency band", *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 6: 1035-1051.

Mori, N. and T. Yasuda. (1994). "Orthonormal wavelet analysis for deep-water breaking waves". *Proceedings of the 24th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, Kobe*, vol.1, pp.850-863.

Morlet, J., Arehs, G., Fourgeau, I., & Giard, D. (1982). "Wave propagation and sampling theory". *Geophysics*, 47, pp 203.

Morlet, J., G. Arehs, E. Furgeau, and D. Giard. (1983). "Wave propagation and sampling Theory: 2, Sampling theory and complex waves", *Geophysics*, pp 222–236.

Morlet, J. (1981). "Sampling theory and wave propagation". *Proc. 51st Annu. Meet. Soc. Explor. Geophys.*, Los Angeles.

Munk, W., F. Snodgrass, and G. Carrier. (1956). "Edge waves on continental shelf". *Science*, 123, 127-132.

Munk, W. (1949). "Surf Beats." *American Geophysical Union*, 30(6), pp 849-854.

Murray, R. J. (1989). "Short wave modelling using new equations of Boussinesq type." *Proc. Ninth Australasian Conf.*

Nakamura, S. (1975). "Nonlinear lateral Oscillation in haurbour model." *Symposium on Modelling Techniques '75, 2° Annual Symposium of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering*. ASCE, pp 836-853.

Nwogu, O. (1993). "Alternative form of Boussinesq equations for nearshore wave propagation." *J. Waterways, Port, Coastal, Ocean Engng ASCE*, 119, pp 618-638.

Okihiro, M., & Guza, R. T. (1996). "Observations of Seiche Forcing and Amplification in Three Small Harbors." *J. Wtrwy., Port, Coast., and Oc. Engrg.*, 122(5), pp 232-238.

Okihiro, M., Guza, R. T., & Seymour, R. J. (1992). "Bound infragravity waves." *J. Geophys Res.*, 97(C7), pp 11453.

Otero, L. (2008). "Metodología para evaluar la peligrosidad debido a Tsunamis en zonas costeras". Tesis doctoral. Universidad de Cantabria.

Ottesen-Hansen, N.-E., Sand, S. E., Lundgren, H., Sørensen, T., & Gravesen, H. (1980). "Correct Reproduction of Group-Induced Long Waves." *17th Coastal Engineering Conference, Sydney*.

Peregrine, D. H. (1967). "Long waves on a beach." *J. Fluid Mech.*, 27, pp 815–827.

---

Pérez-Ruzafa, A., Marcos, C. & Pérez-Ruzafa, I.M. (2011). “Recent advances in coastal lagoons ecology: evolving old ideas and assumptions”. *Transitional Waters Bulletin*, 5 (1): 50-74.<http://siba-ese.unisalento.it/index.php/twb/article/view/12306>.

Pérez-Ruzafa, A., Marcos, C., Pérez-Ruzafa, I.M. & Pérez-Marcos, M. (2011). “Coastal lagoons: “transitional ecosystems” between transitional and coastal waters”. *Journal of Coastal Conservation*, 15: 369-392.

Pérez-Ruzafa, A., Marcos, C & Pérez-Ruzafa, I.M. (2011). “Mediterranean coastal lagoons in an ecosystem and aquatic resources management context”. *Physics and Chemistry of the Earth*, 36: 160-166.

Pernas, J. (1992). “Meteorological causes of seiches in Catalan-Balearic Coast”. Trabajo de fin de carrera. Universidad de Barcelona.

Proudman, J. (1993). “Dynamical Oceanography”, *Methuen–John Wiley*, London, 409, 1953.

Rabinovich, A.B., Monserrat, S. (1996). “Meteorological tsunamis near the Balearic and Kuril Islands: Descriptive and statistical analysis”. *Natural Hazard*, pp 55–90.

Rabinovich, A.B., and Monserrat, S. (1998). “Generation of meteorological tsunamis (large amplitude seiches) near the Balearic and Kuril Islands”. *Natural Hazards*, 18, (1), 27-55.

Ramis, C., R. Romero, and V. Homar. (2009). “The severe thunderstorm of 4 October 2007 in Mallorca: an observational study”. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, 1237–1245, 2009.

Ramis, C. and Jansà, A. (1983). “Condiciones meteorológicas simultáneas a la aparición de oscilaciones del nivel del mar de amplitud extraordinaria en el Mediterráneo occidental”. *Rev. Geofísica*, 39, 35-42 (in Spanish).

Rueda, F.J. and S.G. Schladow (2002).”Surface seiches in lakes of complex geometry”. *Limnology and Oceanography*, 47(3), 906-910.

Schaffer, H. A. (1990). “Infragravity water waves induced by short-wave groups”. *Series paper 50, Inst. Hydrodyn. Hydr. Eng. (ISVA)*, Tech. Univ. Denmark, 168 pp.

Schäffer, H. A., Madsen, P. A., & Deigaard, R. (1993). "A Boussinesq model for waves breaking in shallow water." *Coastal Engineering*, 20(3-4), pp 185-202.

Schäffer, H. A., & Svendsen, I. A. (1988). "Surfbeat generation on a mild slope beach." *Proc. 21th Intern. Conf. on Coastal Eng, Costa del Sol-Malaga, Spain.*, pp 1058-1072.

Seabergh, W.C. and Thomas, L.J. (1995). "Los Angeles Harbor Pier 400 harbor resonance model study," Technical Report CERC-95-8, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS.

Shillington, F. A. (1984). "Long period edge waves off southern Africa". *Continental Shelf Research*, 3(4), pp. 343-357.

Sinadinovski, C., M. Somerville, K. F. McCue and B. Talai. (2001). "Spectral Characterisation of Tsunamis and Seiches Caused by Tectonism and Volcanism in Rabaul, Papua New Guinea". *Natural Hazards*. 24(3): 285-294.

Singer, J.; Manley, T.; McLaren, P.; Manley, P.; Atkinson, J. F.; Hughes, W.; Klawinski, A. (2011). "Lake Erie Seiches and Their Impact on Hydrodynamics and Sediment Transport in the Buffalo River, Buffalo, New York". American Geophysical Union, Fall Meeting.

Snodgrass, F. E., Munk, W. H. and Miller, G. R. (1962). "Long-period waves over California's continental borderland. Part I. Background Spectra". *J. Mar. Res.*, 20(1):3-30.

Tel, E. (2005). "Variabilidad y tendencias del nivel del mar en las costas de la península ibérica y zonas limítrofes: su relación con parámetros meteorológicos". Tesis doctoral. Universidad de Salamanca.

Tintoré, J., Gomis, D., Alonso, S., and Wang, D. P. 1988: "A theoretical study of large sea level oscillations in the western Mediterranean", *J. Geophys. Res.*, 93, pp10 797–10 803.

Titov, V.V., A.B. Rabinovich, H. Mofjeld, R.E. Thomson, and F.I. González (2005). "The global reach of the 26 December 2004 Sumatra tsunami". *Science*, 309, 2045-2048.

- 
- Tominaga, M. (1977). "Tidal abnormality in harbors Makurasajy and Nagasaky". *Kaigan-Saigai-Kenkyuu-News (Coastal Disaster News)*, 22, 3-7 (In Japanese).
- Toro, E.F., and P. García-Navarro (2007). "Godunov-Type methods for free-surface shallow flows: A review". *J. Hydr. Res.* 45(6), 736-751.
- Torrence, C., & Compo, G. P. (1998). "A practical guide to wavelet analysis." *Bull. Amer. Meteor. Soc.*
- Van Dorn, W. G. (1984). "Some tsunami characteristics deducible from tide records". *J. Phys. Oceanogr.*, 14, pp 353–363.
- Vidal, C., R. Medina, S. Monserrat, F. L. Martín (2000). "Harbor Resonance induced by pressure-forced surface waves", *Coastal Engineering*, 2000, pp 3615-3628.
- Vilibić, I., S.Monserrat, A. Rabinovich, H. Mihanović. "Numerical Modelling of the Destructive Meteotsunami of 15 June, 2006 on the Coast of the Balearic Islands". *Pure Appl. Geophys.* 165 (2008) 2169-2195.
- Wei, G., Kirby, J. T., Grilli, S. T., & Subramanya, R. (1995). "A fully nonlinear Boussinesq model for surface waves. Part 1. Highly nonlinear unsteady waves." *J. Fluid Mech.*, 294, pp 71-92.
- Wemelsfelder, P.J. (1957). "Origin and effects of long period waves in ports", *Proc. 19th Int. Navigation Congress*, London pp. 34-56.
- Westhuis, J., Groesen, E. v., & Huijsmans, R. (2001). "Experiments and Numerics of Bichromatic Wave Groups." *J. Wtrwy., Port, Coast., and Oc. Engrg.*, 127(6), pp 334-342.
- Wijeratne, E. M. S., P. L. Woodworth and D. T. Pugh "Meteorological and internal wave forcing of seiches along the Sri Lanka coast". *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978–2012). Volume 115, Issue C3, March 2010.
- Wilson, B.W. (1966). "Generation of long-period seiches in Table Bay, Cape Town, by barometric oscillations". *Transactions of the American Geophysical Union* 35 (5), pp 733–746.
-

Wilson, B.W (1972). "Seiches". *Advances in Hydroscience* 8, pp 1–94.

Wilson, B. W., and Torum, A. (1965). "The Tsunami of the Alaskan Earthquake, 1964". *U.S. Army Corps of Engineers Coastal Engineering Research Center Technical Memorandum*, pp 18-25.

Woo, S.-B., & Liu, P. L.-F. (2004). "Finite-Element Model for Modified Boussinesq Equations. I: Model Development". *J. Wtrwy., Port, Coast., and Oc. Engrg.*, 130(1), pp 1-16.

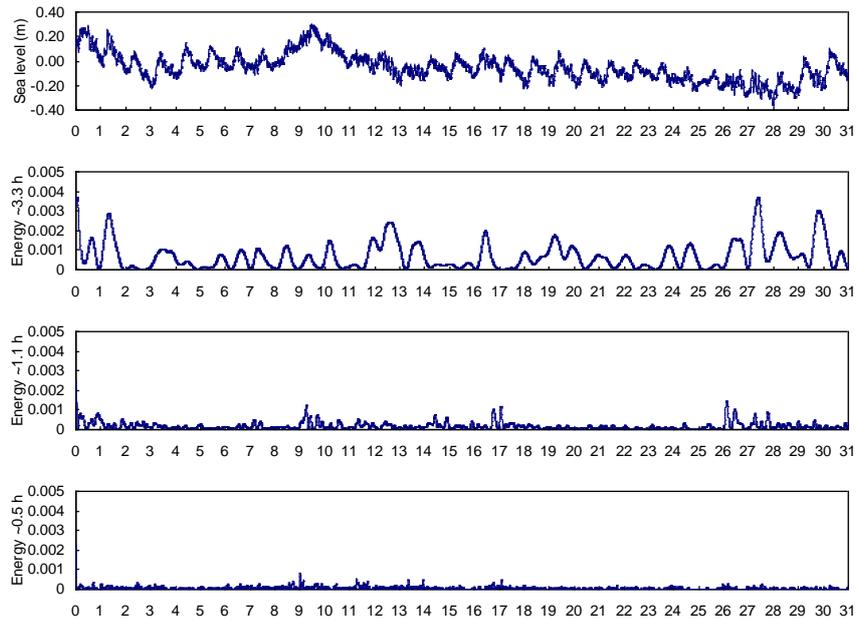
Yanuma T. and Tsuji Y. (1998). "Observation of Edge Waves Trapped on the Continental Shelf in the Vicinity of Makurazaki Harbor, Kyushu, Japan". *Journal of Oceanography*, Vol. 54, pp. 9-18.

Zelt, J. A. (1986). "Tsunamis: The Response of Harbors with Sloping Boundaries to Long Wave Excitation." *Report KH-R-47, W.M. Keck Lab. of Hydraulics and Water Resources.*

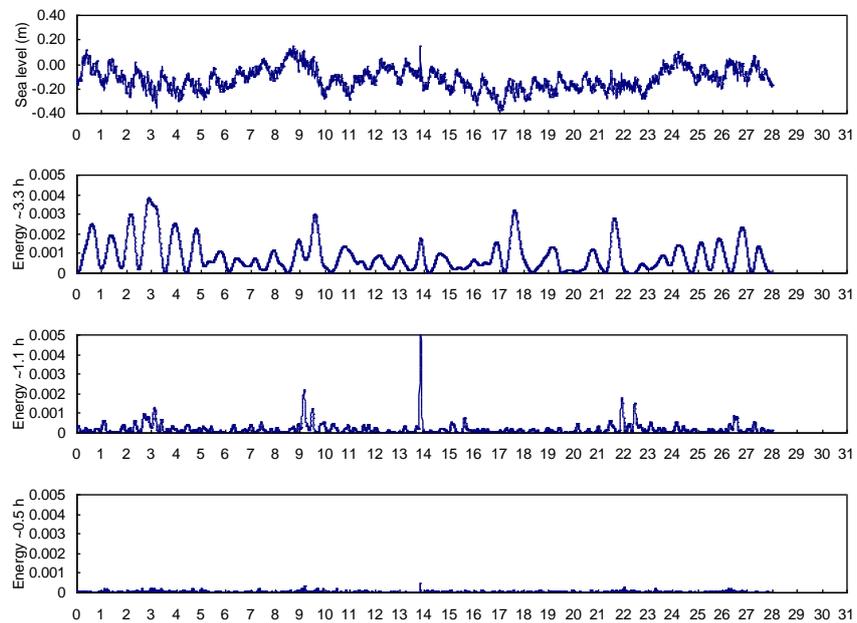
## **ANEXO 1**

# **RESULTADOS DEL ANÁLISIS TEMPORAL DEL NIVEL DEL MAR Y ENERGÍA WAVELET EN ALFACS Y FANGAR**

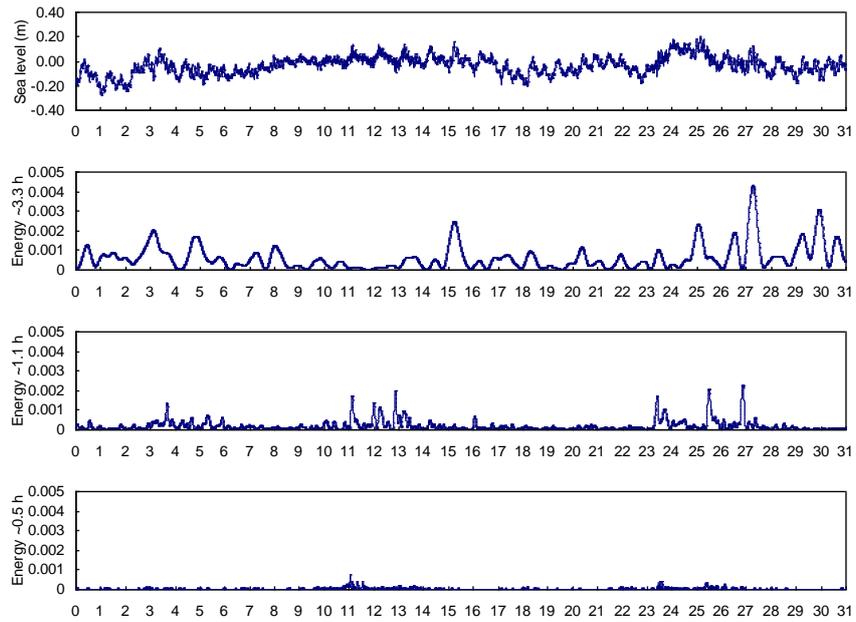
ALFACS



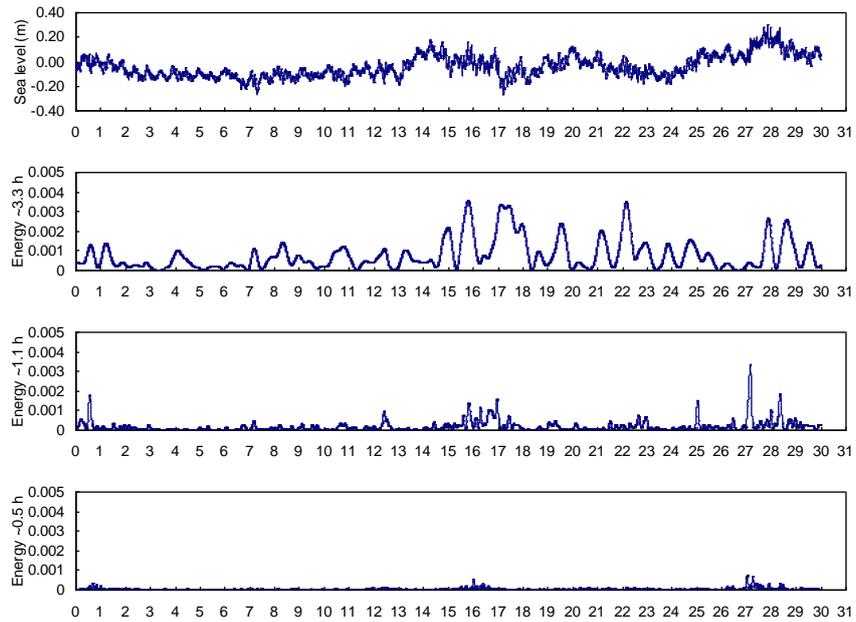
**Figura 0.1** Variación temporal de la energía en los modos resonantes durante el mes de ENERO de 1999 en Alfacs



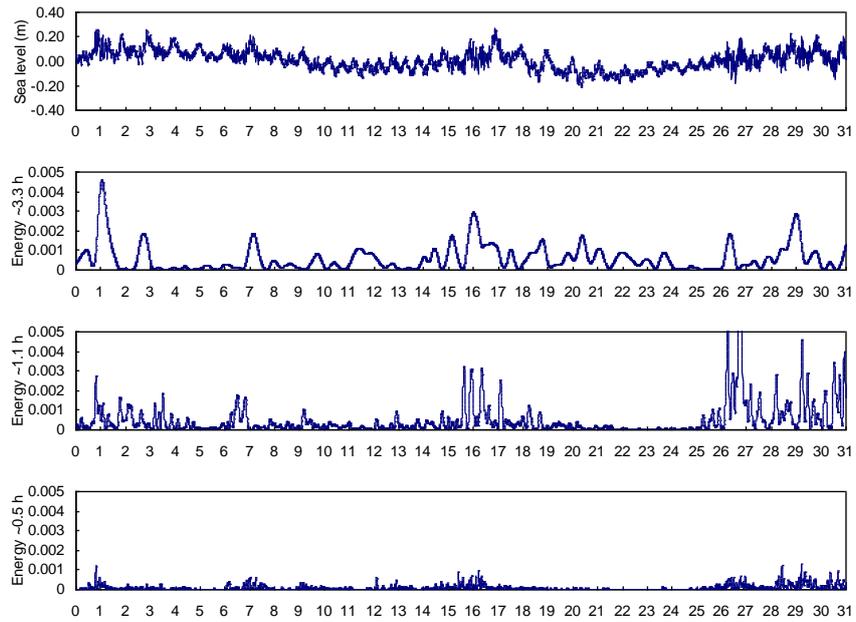
**Figura 0.2** Variación temporal de la energía en los modos resonantes durante el mes de FEBRERO de 1999 en Alfacs



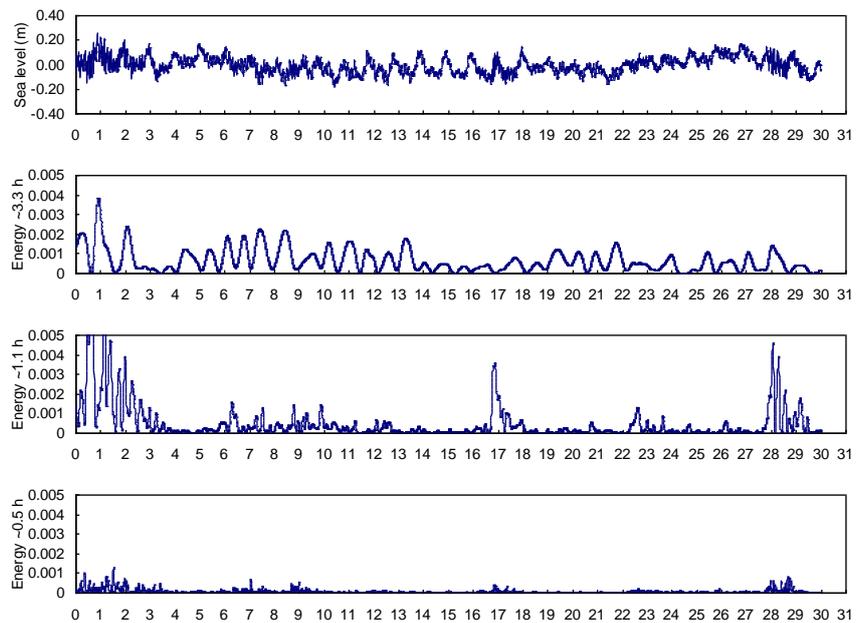
**Figura 0.3** Variación temporal de la energía en los modos resonantes durante el mes de **MARZO** de 1999 en Alfacs



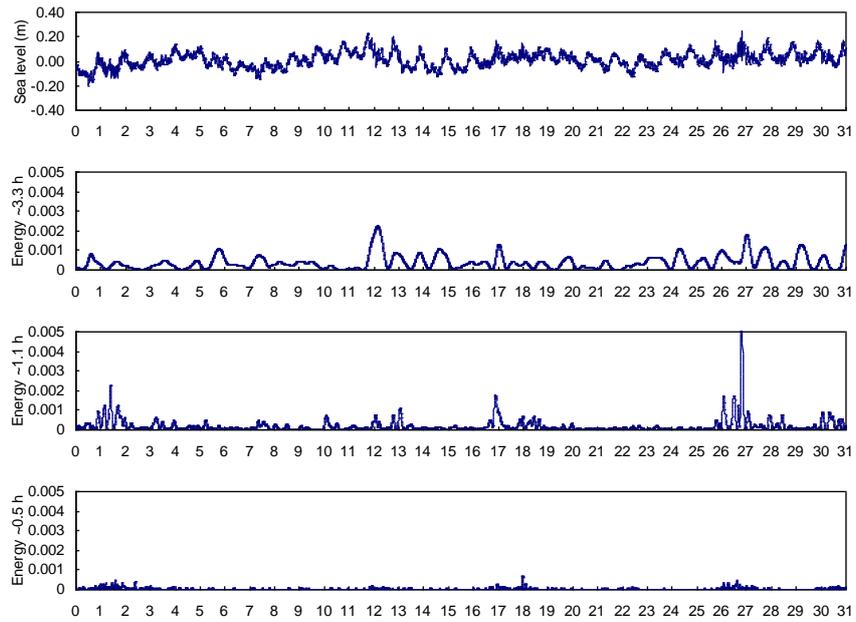
**Figura 0.4** Variación temporal de la energía en los modos resonantes durante el mes de **ABRIL** de 1999 en Alfacs



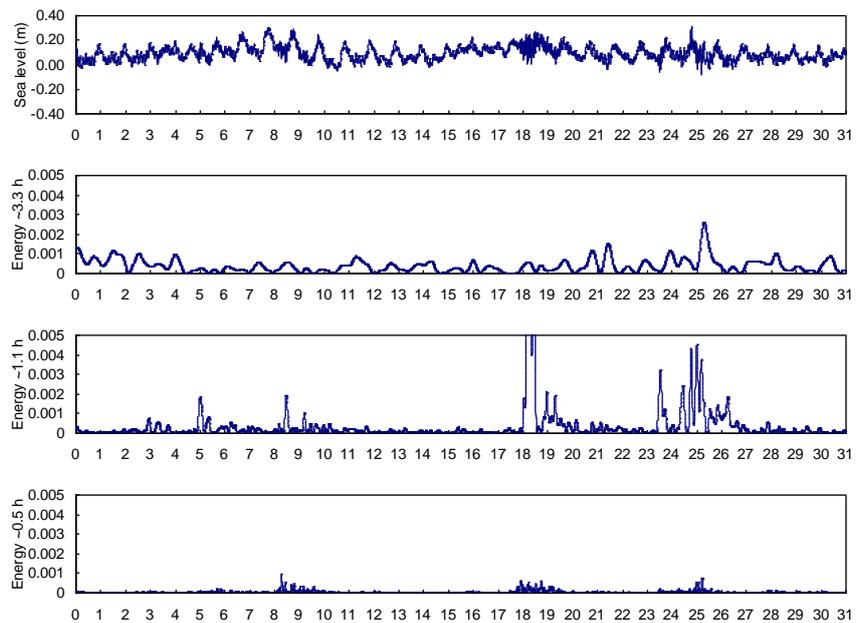
**Figura 0.5** Variación temporal de la energía en los modos resonantes durante el mes de MAYO de 1999 en Alfacs



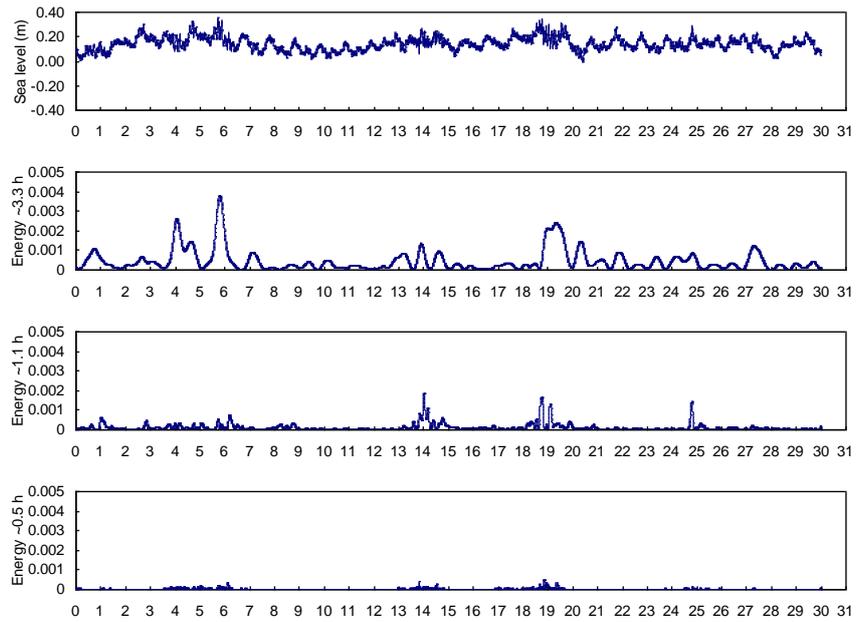
**Figura 0.6** Variación temporal de la energía en los modos resonantes durante el mes de JUNIO de 1999 en Alfacs



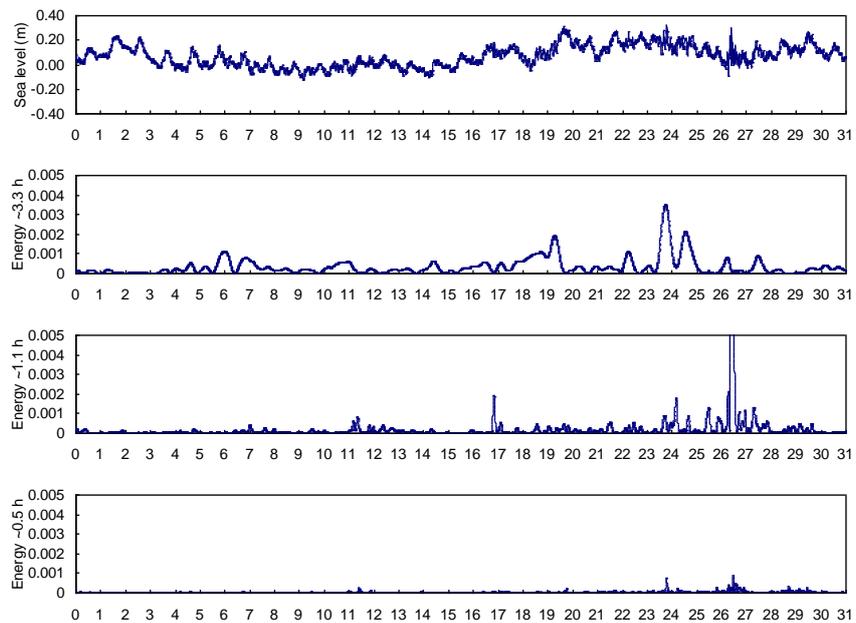
**Figura 0.7** Variación temporal de la energía en los modos resonantes durante el mes de JULIO de 1999 en Alfacs



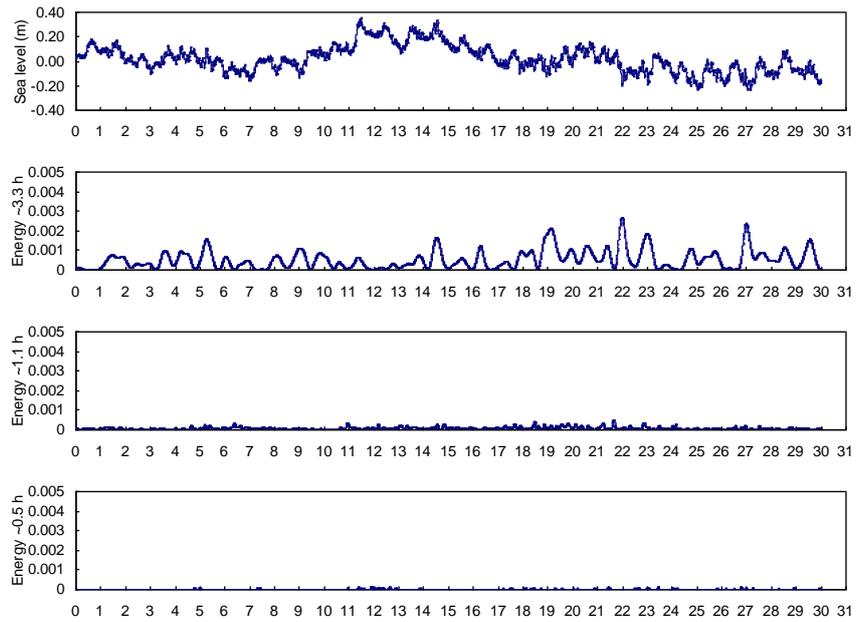
**Figura 0.8** Variación temporal de la energía en los modos resonantes durante el mes de AGOSTO de 1999 en Alfacs



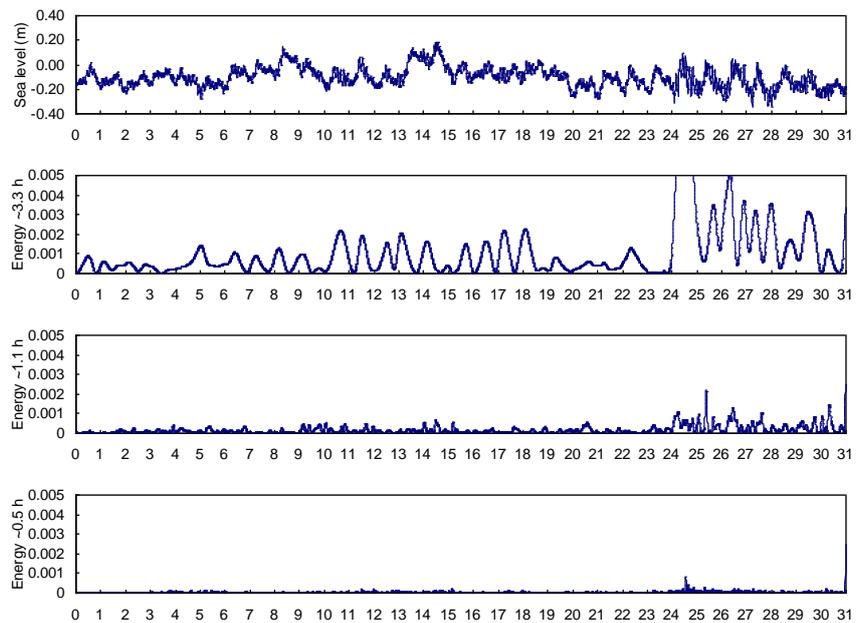
**Figura 0.9** Variación temporal de la energía en los modos resonantes durante el mes de SEPTIEMBRE de 1999 en Alfacs



**Figura 0.10** Variación temporal de la energía en los modos resonantes durante el mes de OCTUBRE de 1999 en Alfacs

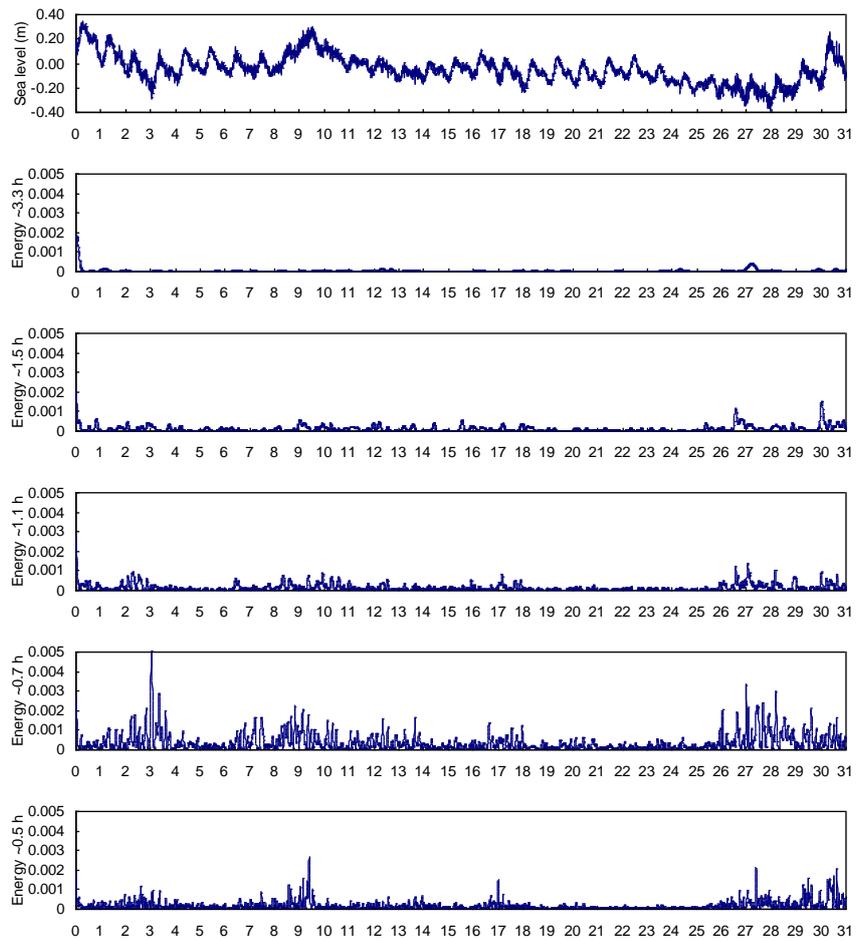


**Figura 0.11** Variación temporal de la energía en los modos resonantes durante el mes de **NOVIEMBRE** de 1999 en Alfacs

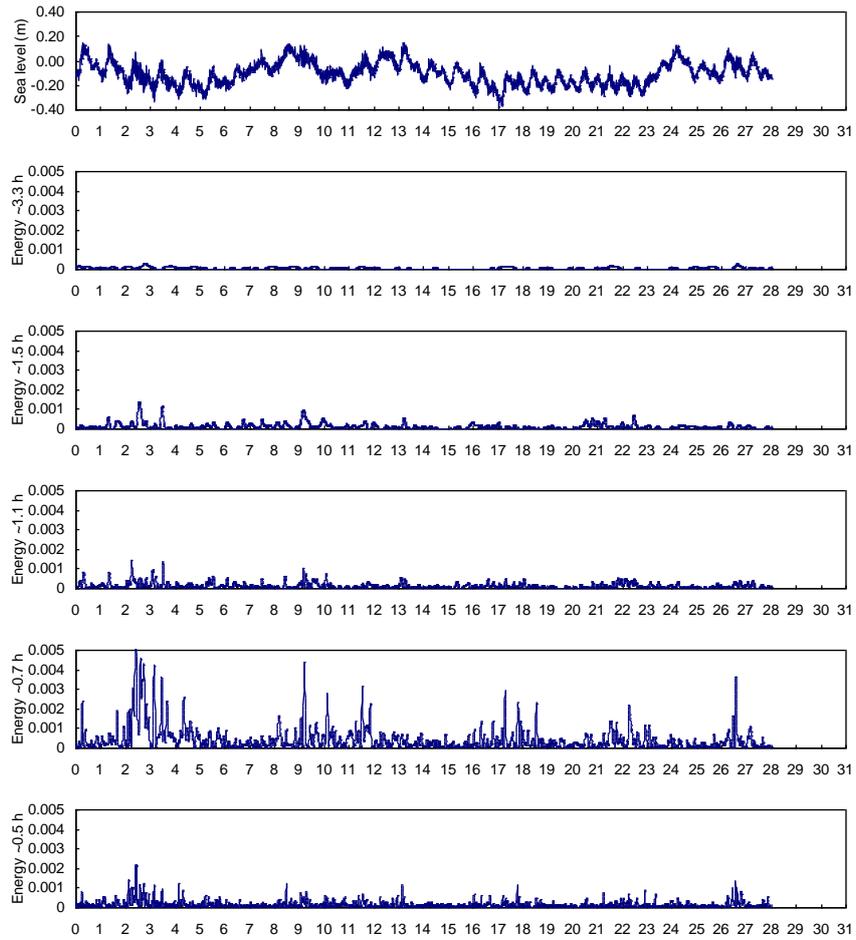


**Figura 0.12** Variación temporal de la energía en los modos resonantes durante el mes de **DICIEMBRE** de 1999 en Alfacs

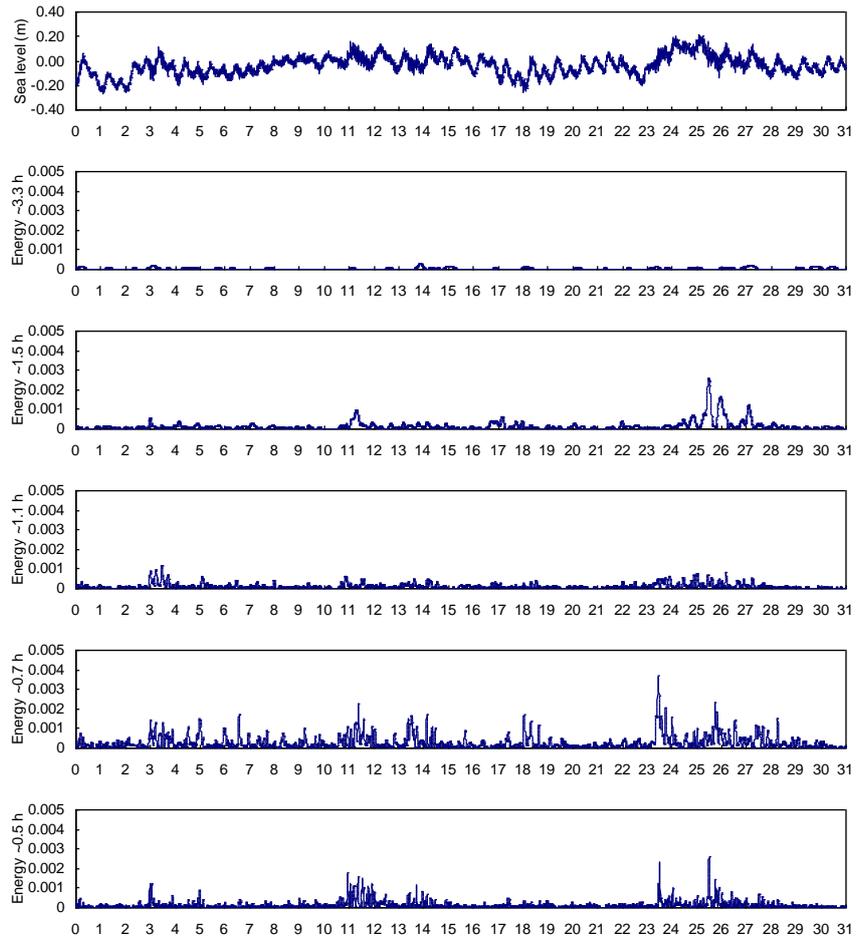
## L'AMPOLLA



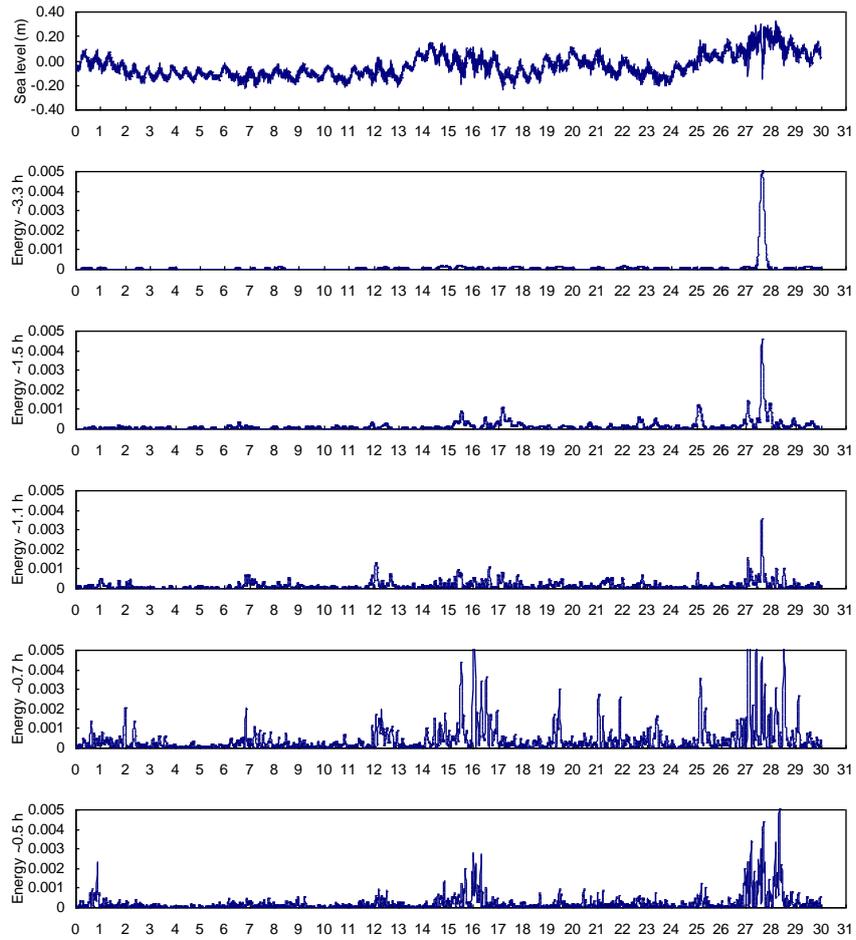
**Figura 0.13** Variación temporal de la energía en los modos resonantes durante el mes de ENERO de 1999 en L'Ampolla



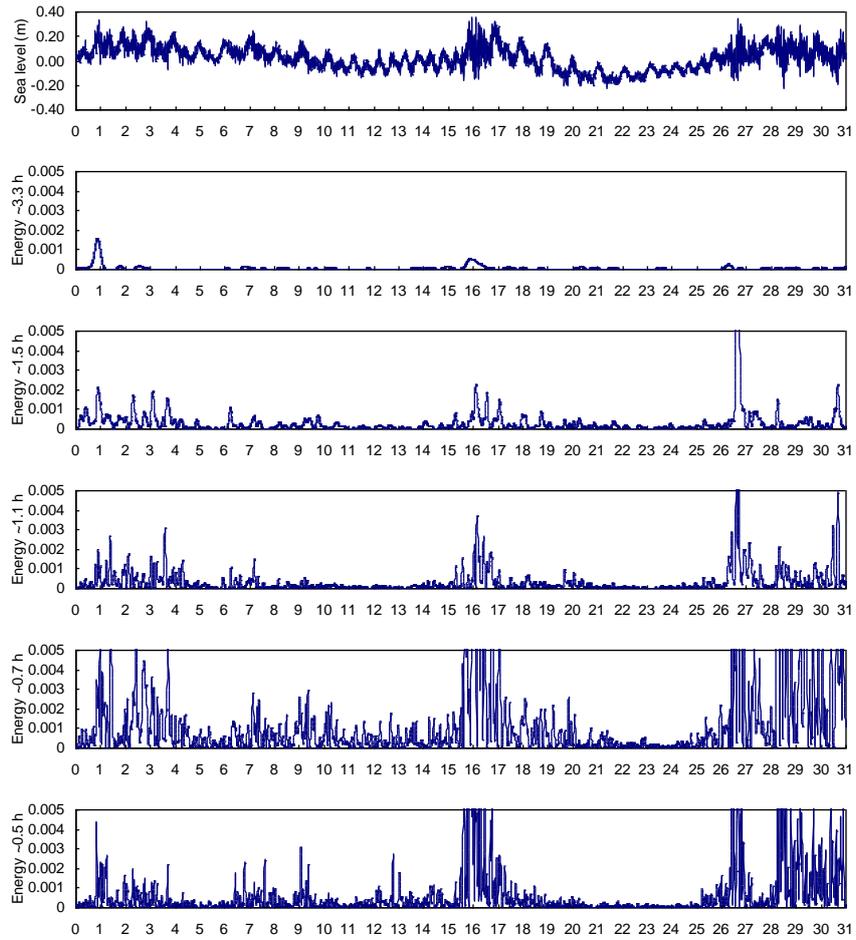
**Figura 0.14** Variación temporal de la energía en los modos resonantes durante el mes de FEBRERO de 1999 en L'Ampolla



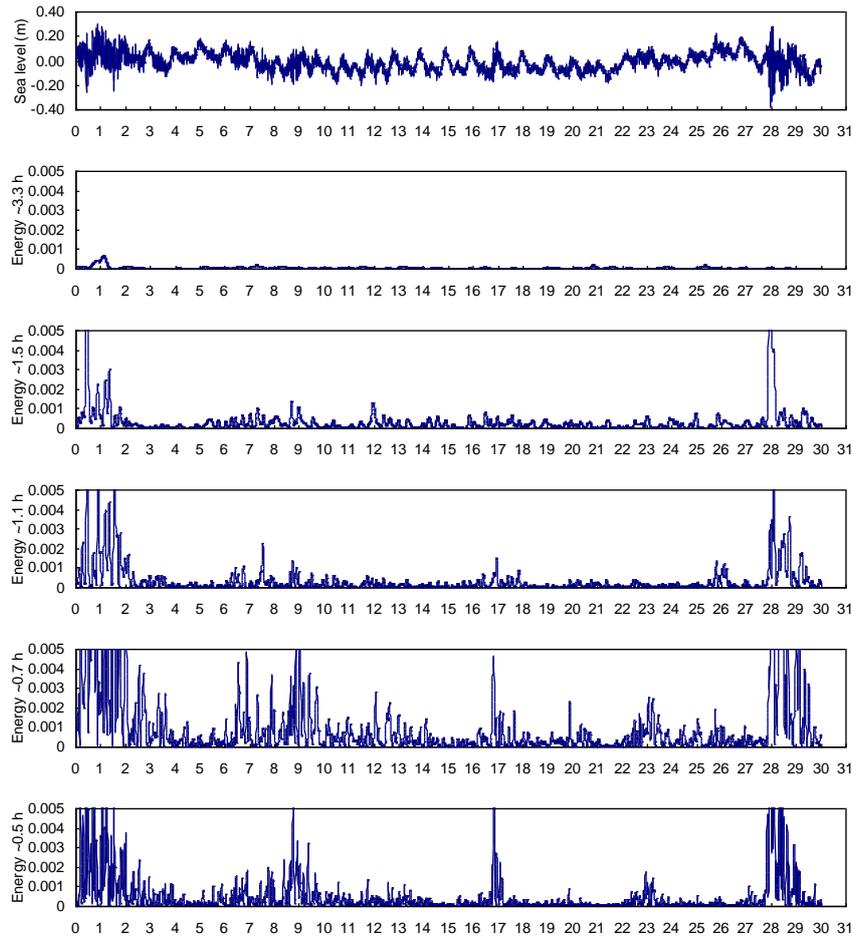
**Figura 0.15** Variación temporal de la energía en los modos resonantes durante el mes de MARZO de 1999 en L'Ampolla



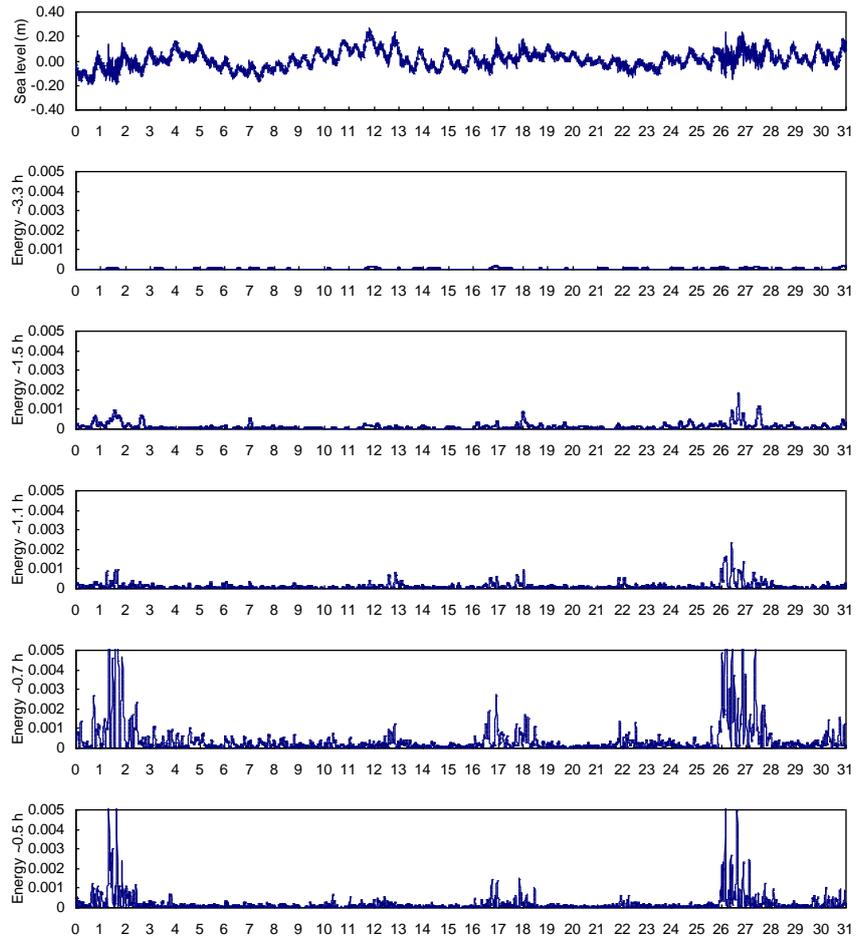
**Figura 0.16** Variación temporal de la energía en los modos resonantes durante el mes de ABRIL de 1999 en L'Ampolla



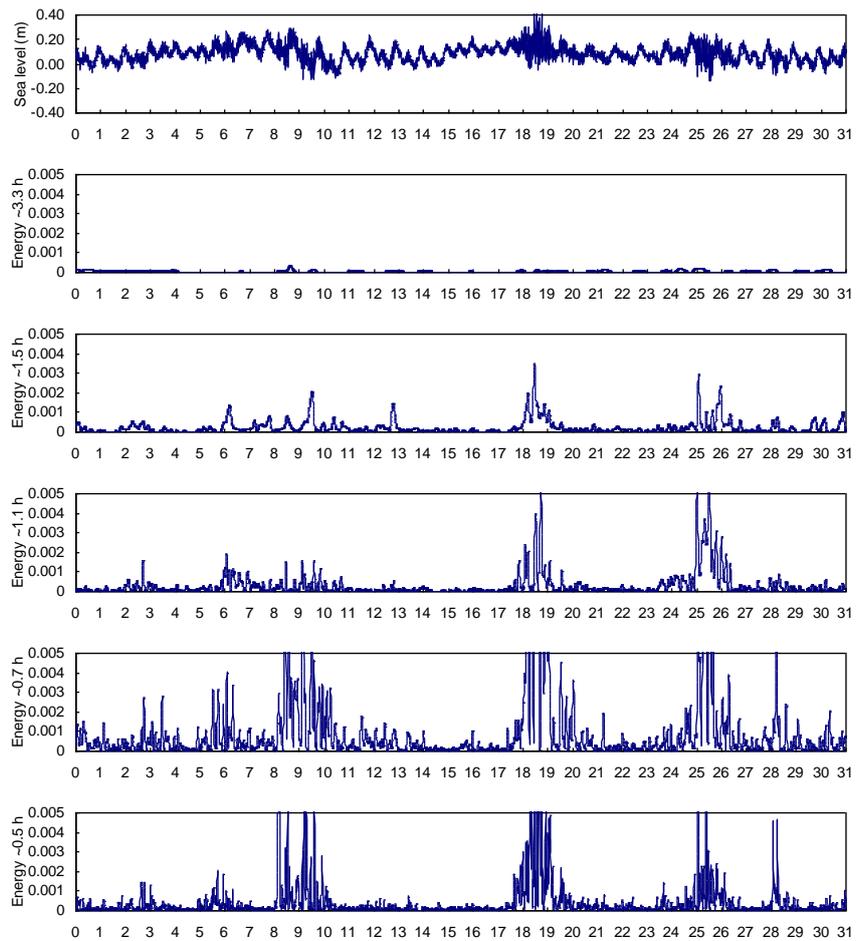
**Figura 0.17** Variación temporal de la energía en los modos resonantes durante el mes de MAYO de 1999 en L'Ampolla



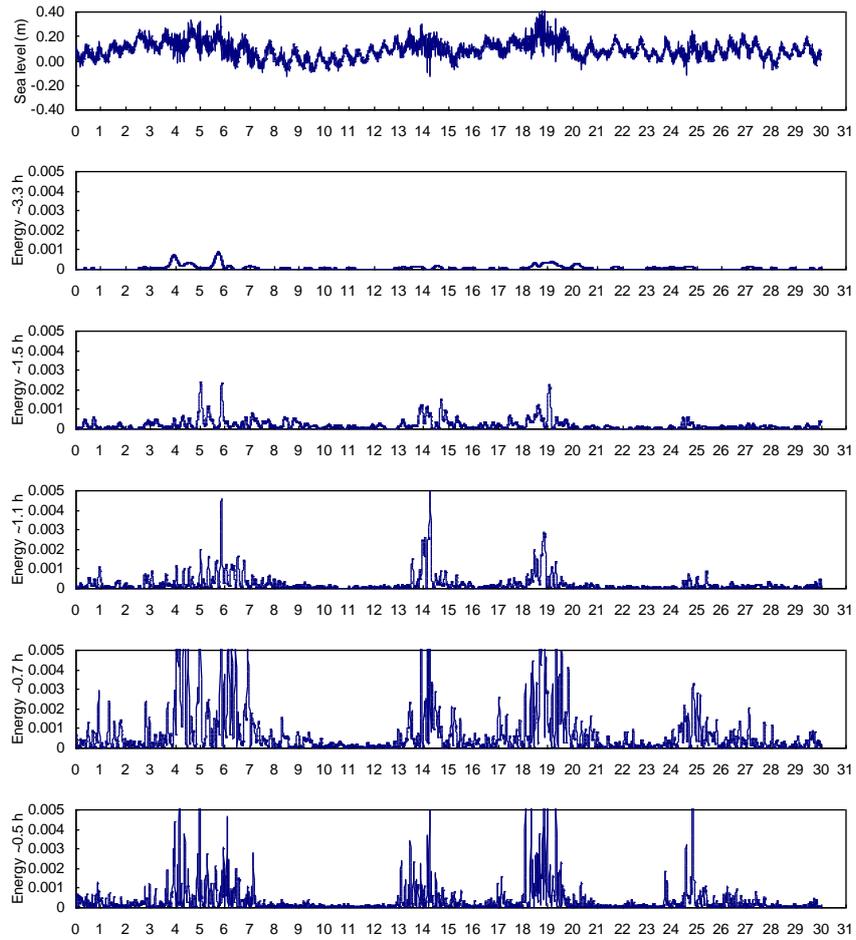
**Figura 0.18** Variación temporal de la energía en los modos resonantes durante el mes de JUNIO de 1999 en L'Ampolla



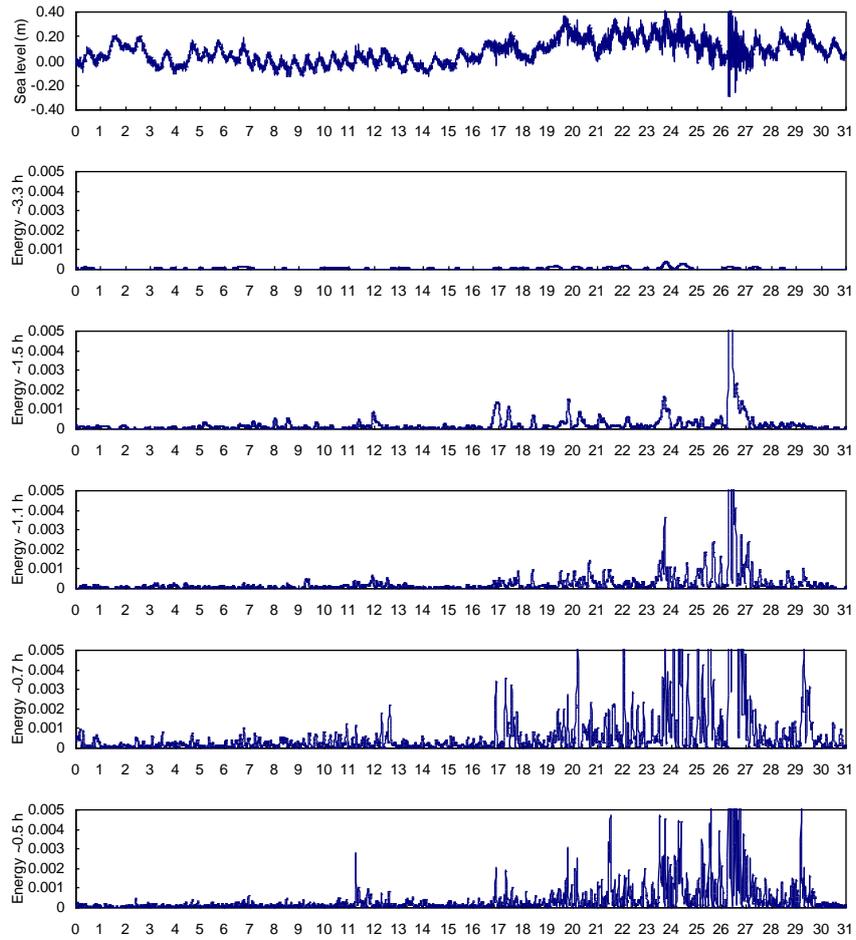
**Figura 0.19** Variación temporal de la energía en los modos resonantes durante el mes de JULIO de 1999 en L'Ampolla



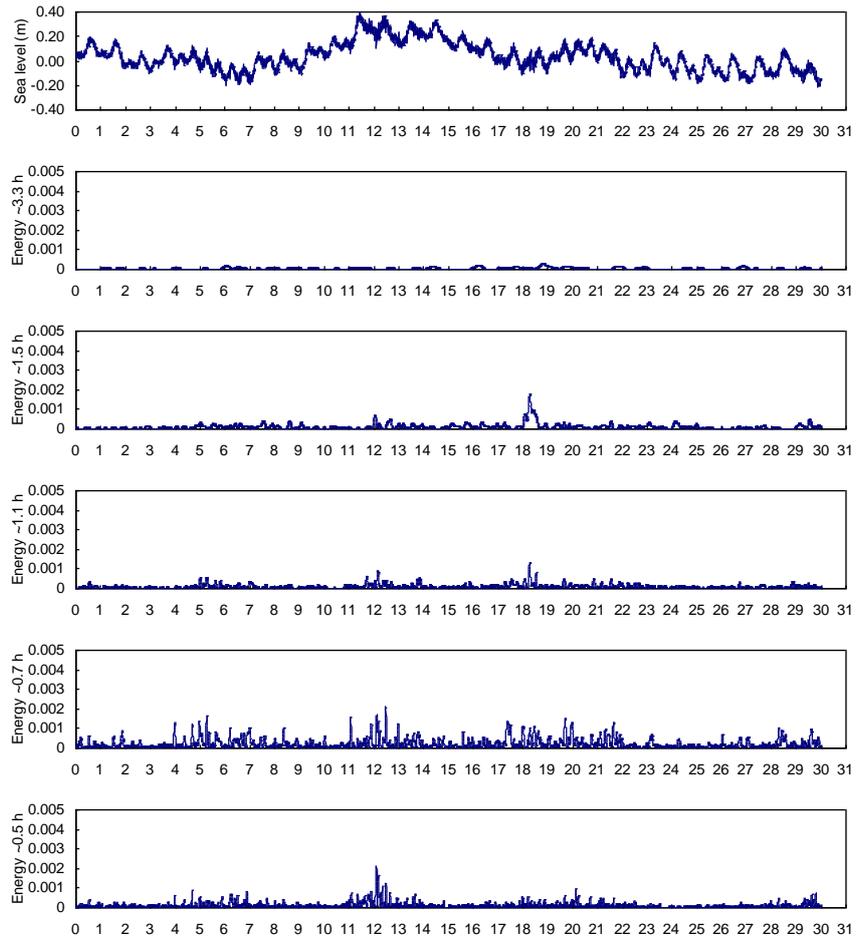
**Figura 0.20** Variación temporal de la energía en los modos resonantes durante el mes de AGOSTO de 1999 en L'Ampolla



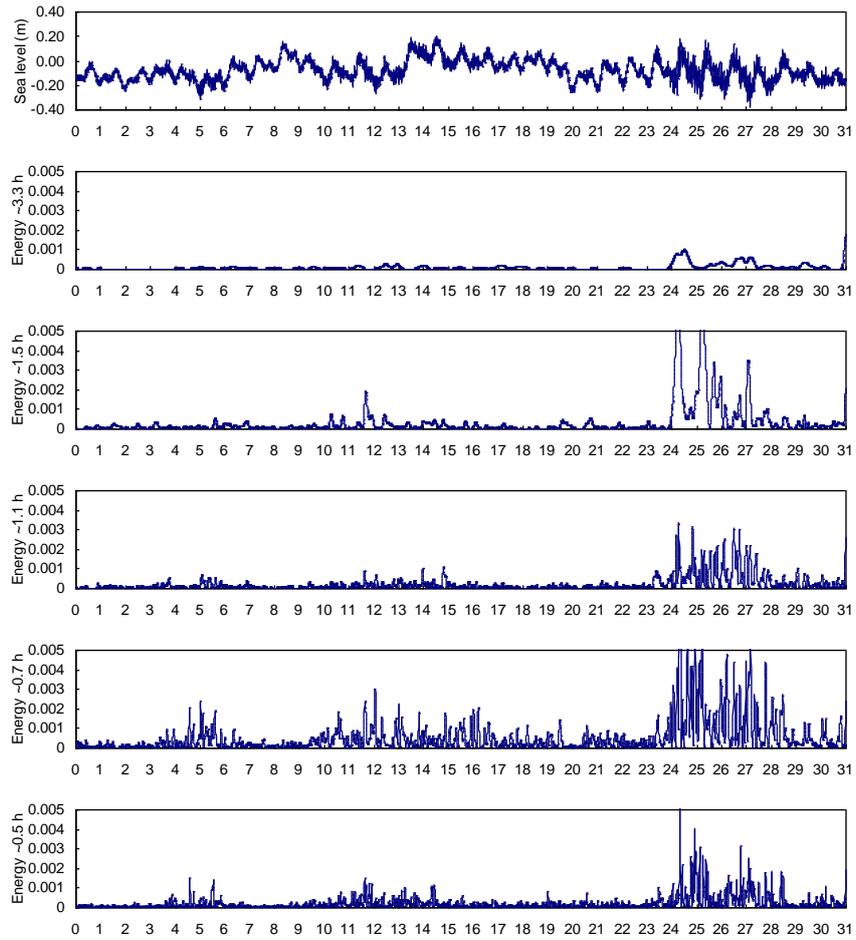
**Figura 0.21** Variación temporal de la energía en los modos resonantes durante el mes de SEPTIEMBRE de 1999 en L'Ampolla



**Figura 0.22** Variación temporal de la energía en los modos resonantes durante el mes de OCTUBRE de 1999 en L'Ampolla



**Figura 0.23** Variación temporal de la energía en los modos resonantes durante el mes de NOVIEMBRE de 1999 en L'Ampolla



**Figura 0.24** Variación temporal de la energía en los modos resonantes durante el mes de DICIEMBRE de 1999 en L'Ampolla

## **ANEXO 2**

**DESCRIPCIÓN DEL MODELO  
NUMÉRICO MSP**

Existen en la actualidad dos metodologías diferentes para el estudio de la propagación de ondas monocromáticas en teoría lineal: resolución por elementos finitos de la "mild-slope equation", resolución por diferencias finitas de la aproximación parabólica de la "mild-slope equation", que describimos brevemente a continuación.

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

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

$$\Delta (\Gamma C C_g \nabla \Phi) + \frac{w^2 C}{C_g} \Phi = 0 \quad (4.1)$$

donde:

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

- g = gravedad
- h = profundidad
- a = amplitud de onda

Esta ecuación es de tipo elíptico, necesitándose para su resolución condiciones de contorno a lo largo de todo el dominio de integración; éstas pueden ser: a) reflexión total o parcial en contornos fijos, b) onda incidente conocida o condición de radiación en contornos abiertos. La resolución del sistema anterior puede realizarse por medio de métodos de elementos finitos.

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

En este caso, el efecto de la difracción (curvatura de la amplitud de onda) en la dirección de propagación es nulo y la difracción sólo ocurre a lo largo de un frente de onda (líneas de igual fase). De este modo, el sistema puede expresarse por:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x} = ik - \frac{1}{2kC C_g} \frac{\partial}{\partial x} (kC C_g) \Phi + \frac{i}{2kC C_g} \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{C C_g \partial \Phi}{\partial y} \right) \quad (4.2)$$

donde:

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

Interpretando la dirección x como "tiempo", el sistema puede ser analizado como un problema de valor inicial con las siguientes condiciones de contorno: a) en  $x = 0$ , se ha de establecer la función potencial en función de la coordenada y b) en la dirección y el modelo debe tener dos contornos con condiciones apropiadas (reflexión o absorción). Debe hacerse notar que en este

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

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

En nuestro caso particular, el estudio de propagación de oleaje en el interior de la dársena debe realizarse por medio de la resolución de la "mild-slope equation", no sólo por los mejores resultados obtenidos por el análisis de Berkhoff, sino por la imposibilidad de los métodos parabólicos de estudios de las reflexiones interiores.

## **Método de resolución**

La ecuación anterior ha sido resuelta por un método híbrido de elementos finitos desarrollado originalmente por Behrendt, 1985, capaz de resolver la ecuación de Helmholtz con fondo variable. En este análisis, el dominio de estudio se divide en dos regiones: región cercana, A, y región lejana, R.

Para la región A se utiliza un método convencional de elementos finitos, mientras que para la región R se utiliza una solución analítica con coeficientes desconocidos. Se establece un principio variacional con un funcional adecuado, de modo que las condiciones de compatibilidad se satisfagan a lo largo de  $\partial A$ .

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

$$\begin{aligned}
\Pi(\Phi, \Phi_R) = & \iint_A \frac{1}{2} \left[ \Gamma C C_{\text{subg}} (\Delta\Phi)^2 - \frac{w^2 C_g}{C} \Phi \right] dA - \\
& - \int_{\partial} B \frac{1}{2} \alpha \Gamma C C_g \Phi^2 dL + \int_{\partial} A \Gamma C C_g \cdot \left[ \frac{1}{2} (\Phi_R - \Phi) - (\Phi - \Phi_0) \right] \frac{\partial \Phi_R}{\partial n_A} dL - \\
& - \int_{\partial} A \frac{1}{2} \Gamma C C_g (\Phi_R - \Phi_0) \left( \frac{\partial \Phi_0}{\partial n_A} \right) dL
\end{aligned} \tag{4.3}$$

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

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

$$\begin{aligned}
\Phi_0 = & - \frac{ig a_0}{w} \exp[ikr \cos(\theta - \theta_0)] = \\
= & - \frac{ig a_0}{w} \sum_{n=0}^N \varepsilon_n i^n J_n(kr) (\cos n \theta_0 \cos n \theta + \text{senn} \theta_0)
\end{aligned} \tag{4.4}$$

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

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

$$\begin{aligned}
\Phi_0 &= -\frac{ig a_0}{w} \exp[ikr \cos(\theta - \theta_0)] + kr \exp[ikr \cos(\theta - \theta_0)] = \\
&= -\frac{ig a_0}{w} \sum_{n=0}^N \varepsilon_n i^n J_n(kr) \cos n\theta_0 \cos n\theta + (1 - kr) \operatorname{senn}\theta_0 \operatorname{senn}\theta
\end{aligned}
\tag{4.5}$$

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

$$\Phi_S = \Phi_R - \Phi_0 = -\frac{ig a_0}{w} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{H_n(kr)}{H_n(kr_a)} (u_n \cos n\theta + \beta_n \sin n\theta)
\tag{4.6}$$

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

$$\Phi_S = \Phi_R - \Phi_0 = -\frac{ig a_0}{w} \sum_{n=0}^{\infty} u_n \cos n\theta \frac{H_n(kr)}{H_n(kr_a)}
\tag{4.7}$$

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

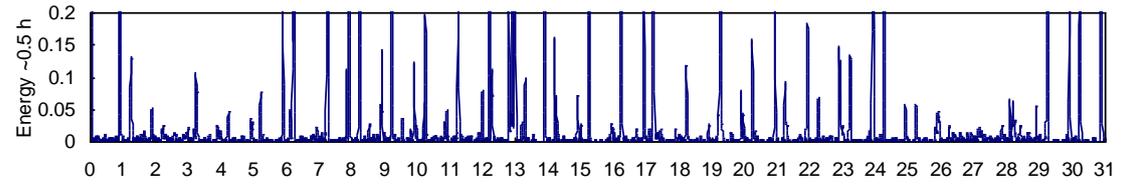
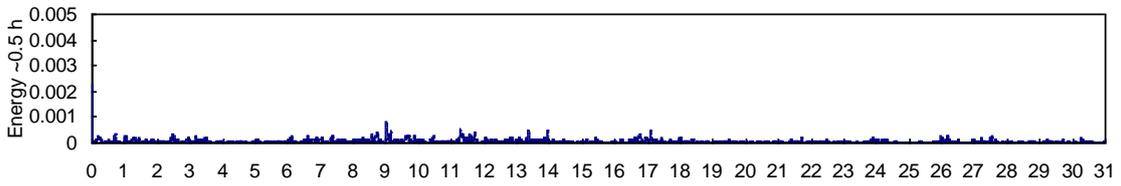
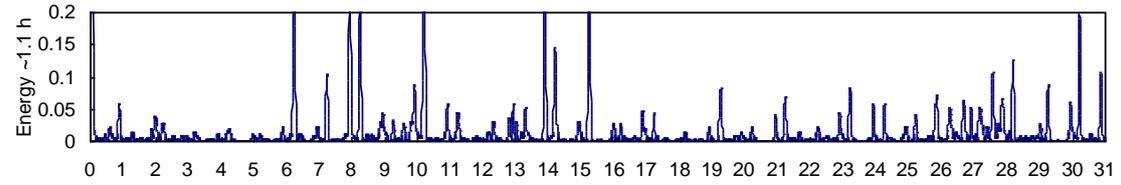
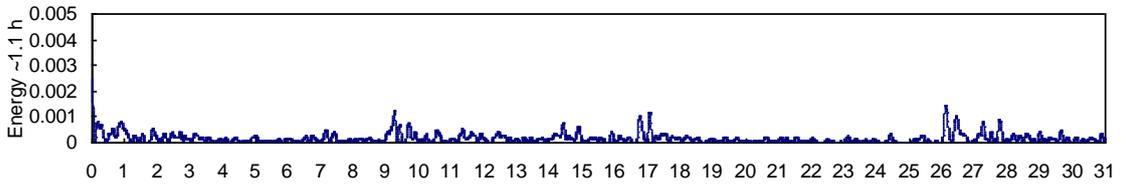
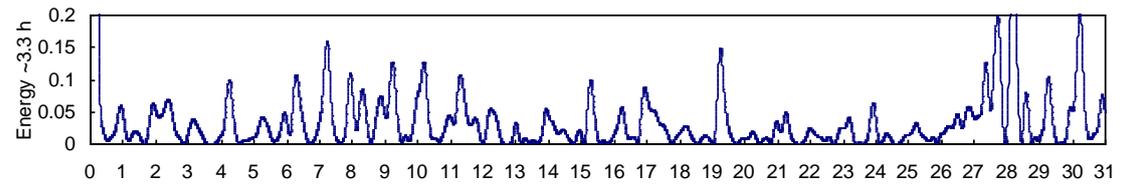
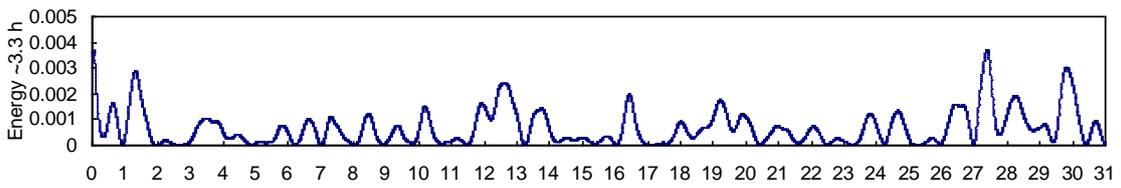
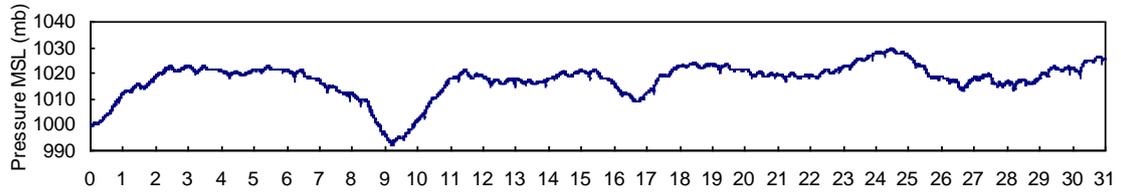
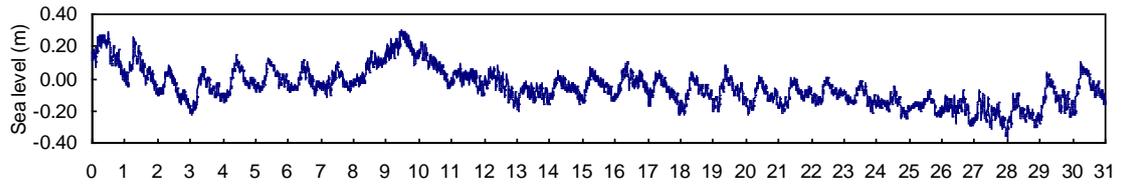
Este modelo contempla, por tanto, no sólo la propagación completa de la onda (refracción-difracción), sino además puede introducir el efecto de fricción por fondo y absorción parcial de estructuras en la región de estudio. En lo referente al coeficiente de fricción por fondo, al carecer de datos medidos ha parecido aconsejable adoptar  $\Gamma = 1$ , esto es, fricción nula. Este coeficiente no modifica apreciablemente los resultados de propagación de oleaje de viento, si bien magnifica las amplitudes en el estudio de oscilaciones de largo período cuando éste coincide con un período resonante.

## **ANEXO 3**

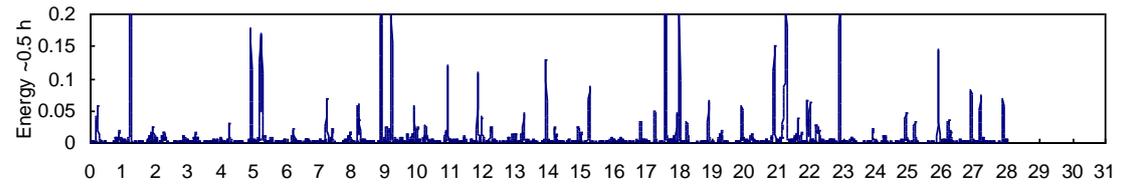
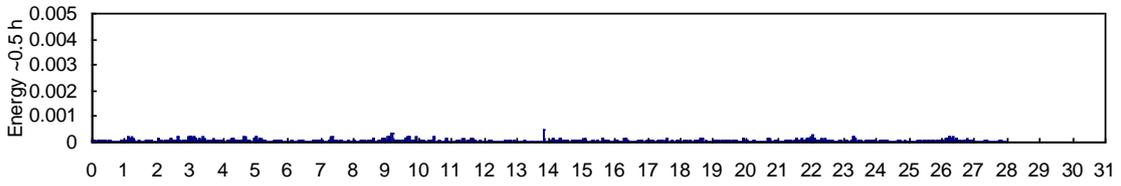
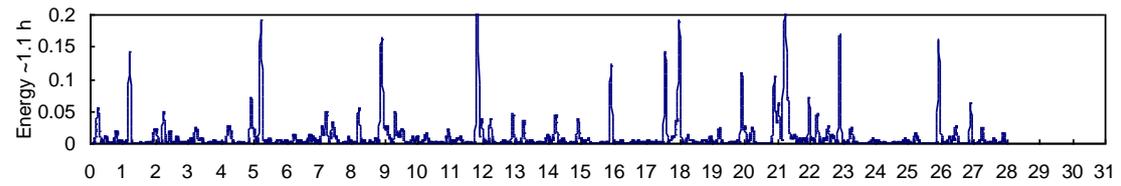
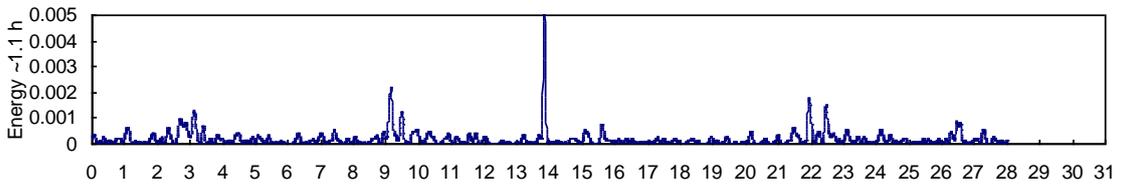
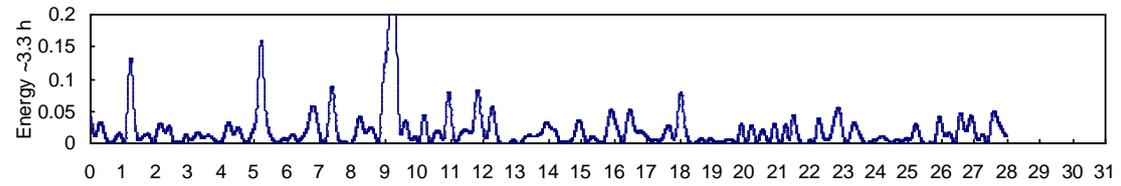
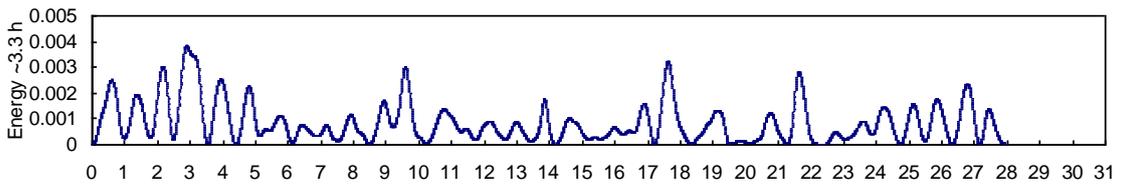
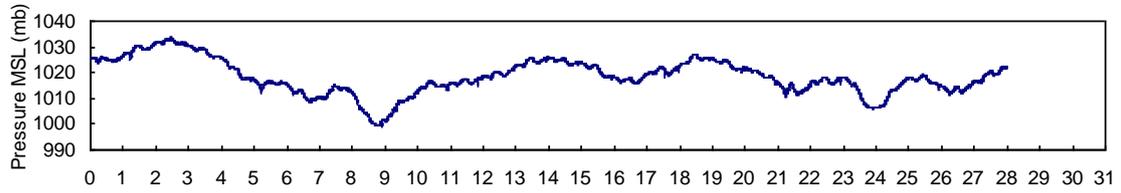
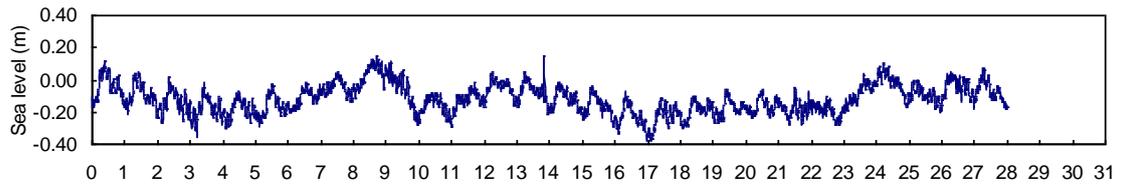
# **RESULTADOS DEL ANÁLISIS TEMPORAL DEL NIVEL DEL MAR Y LA PRESIÓN ATMOSFÉRICA EN ALFACS Y FANGAR**

# ALFACS

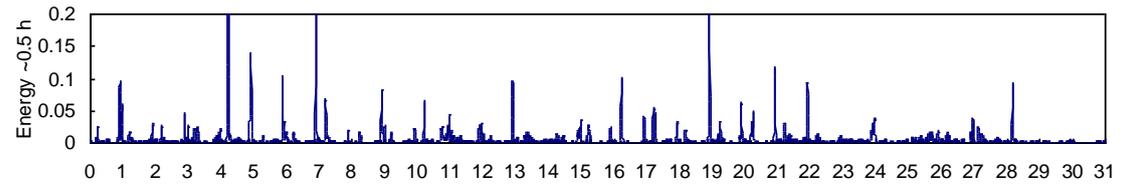
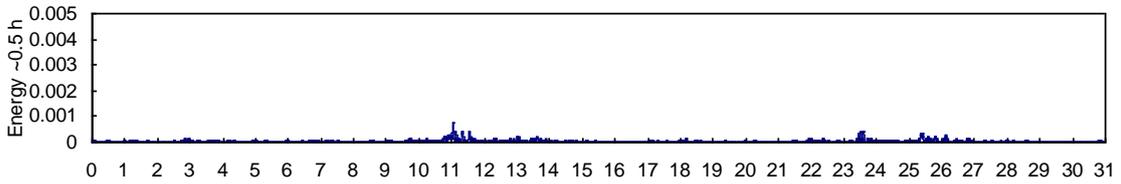
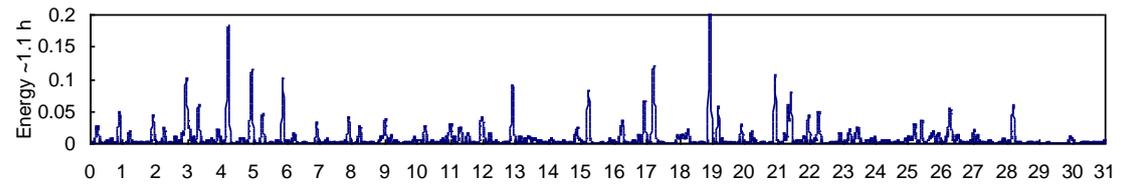
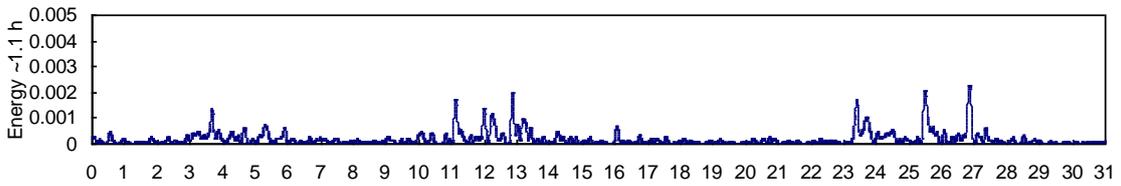
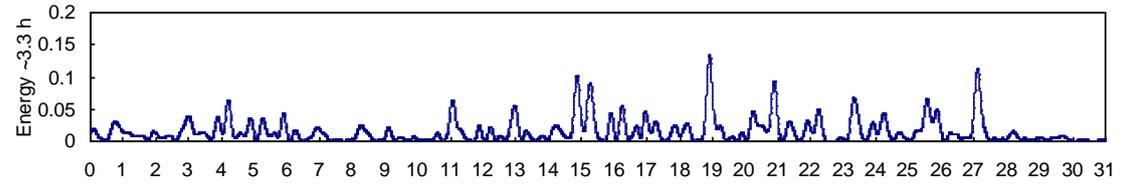
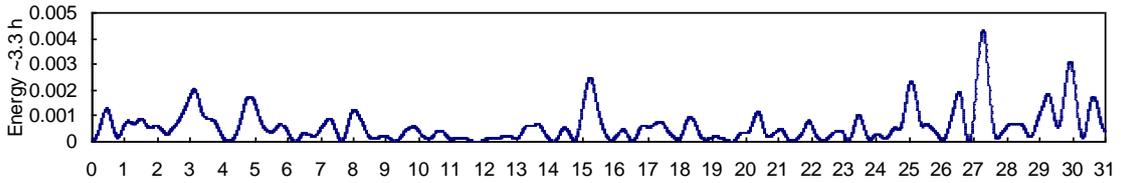
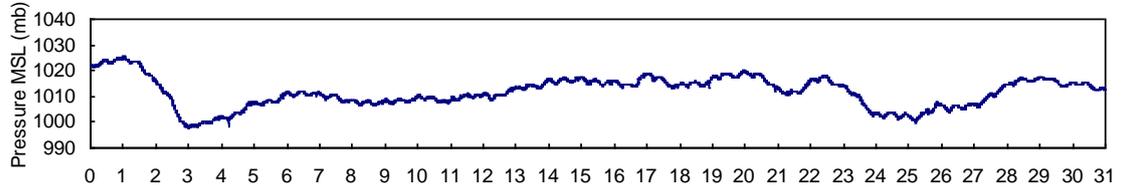
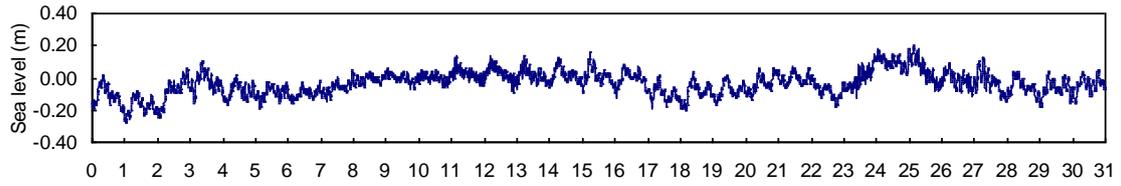
## ENE



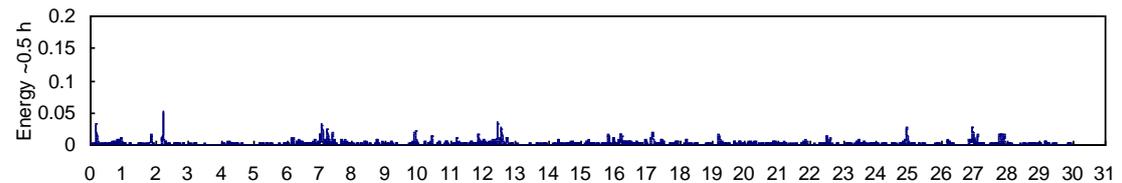
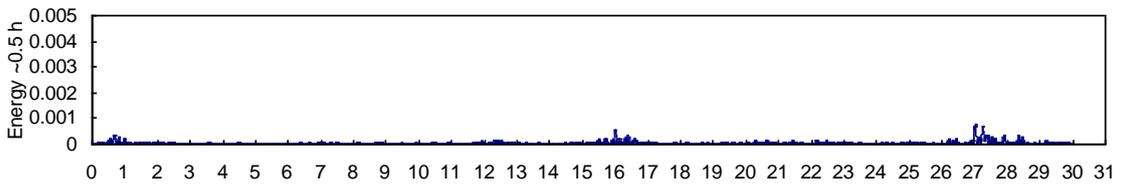
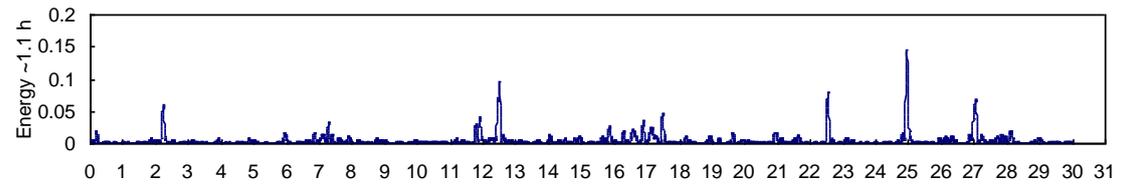
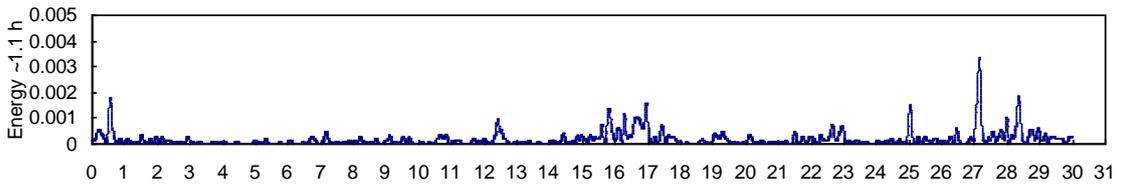
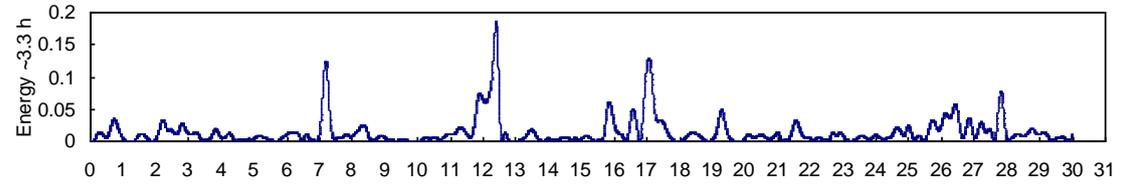
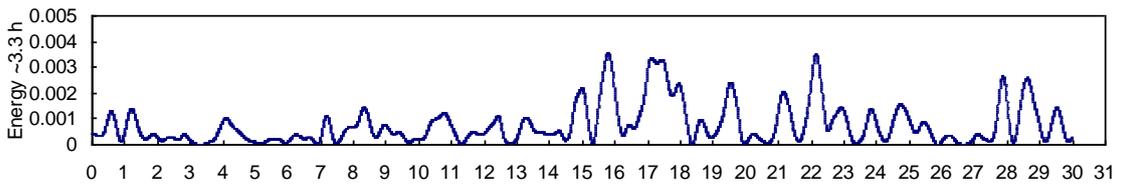
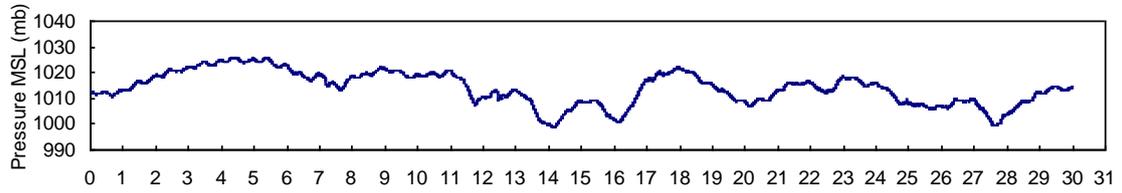
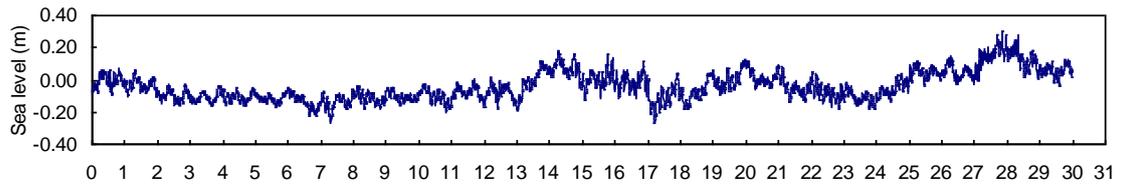
# FEB



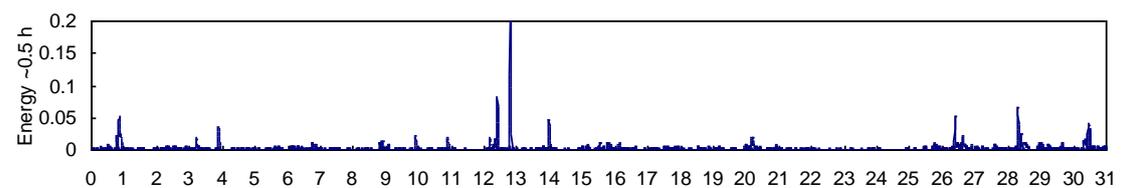
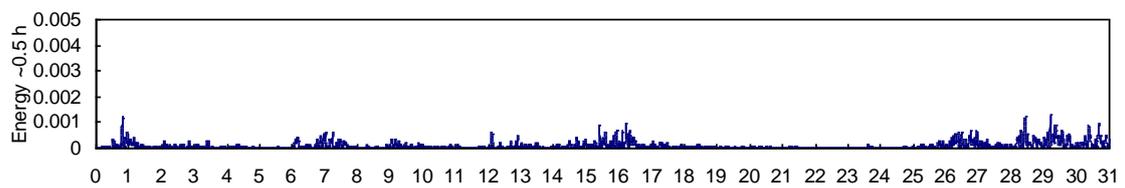
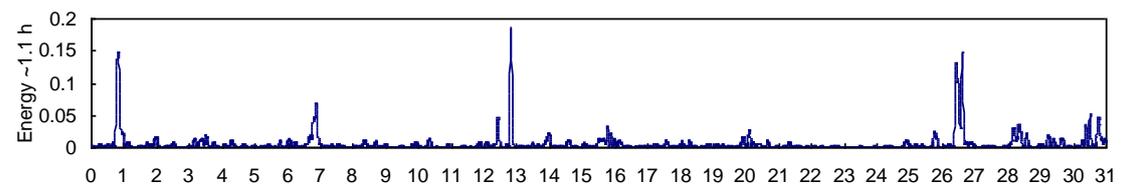
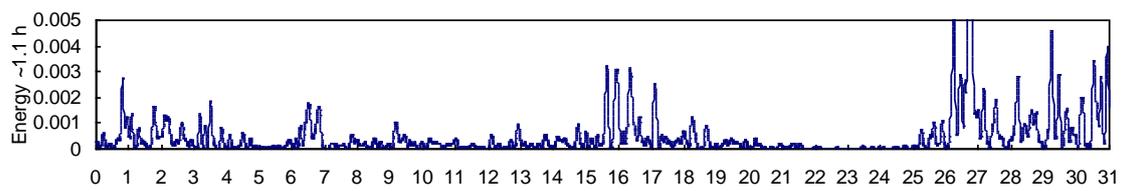
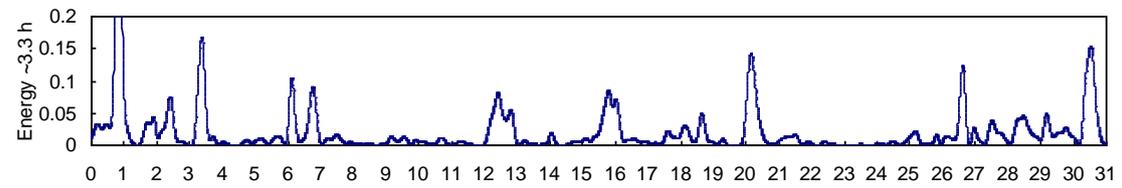
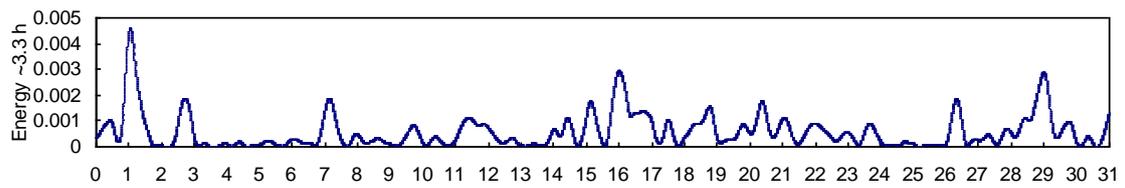
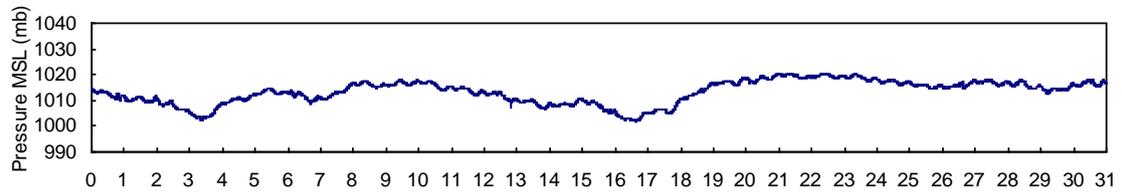
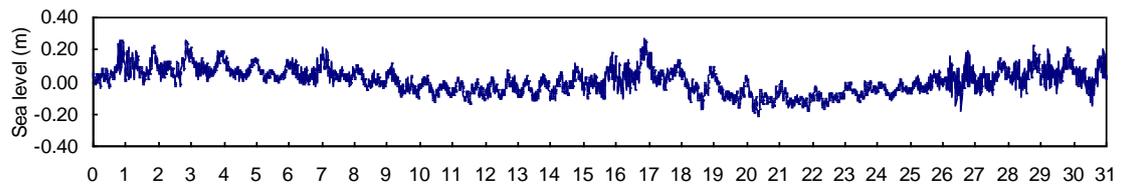
# MAR



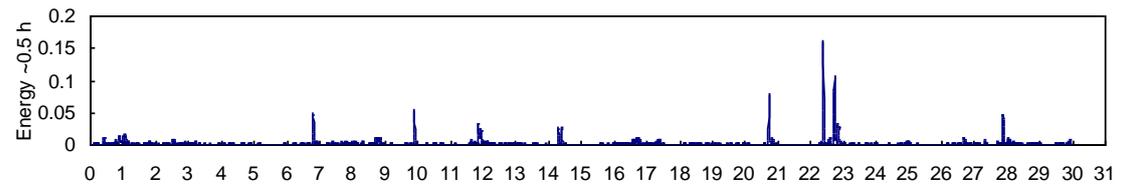
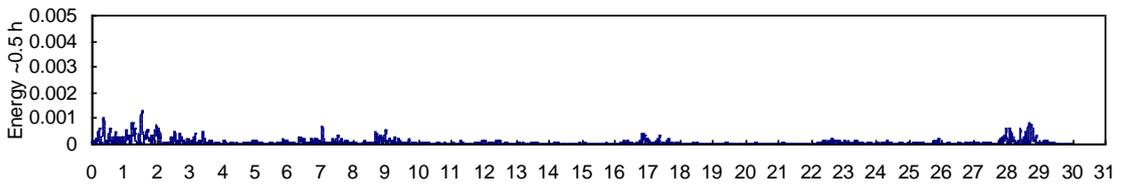
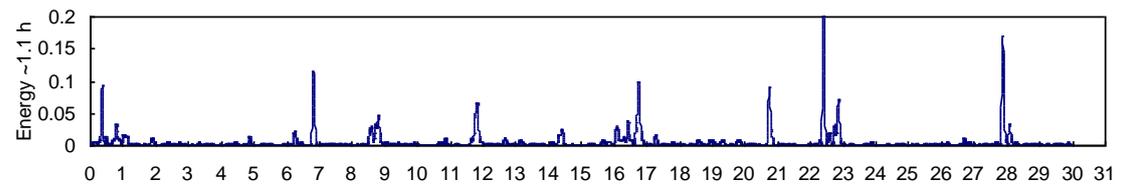
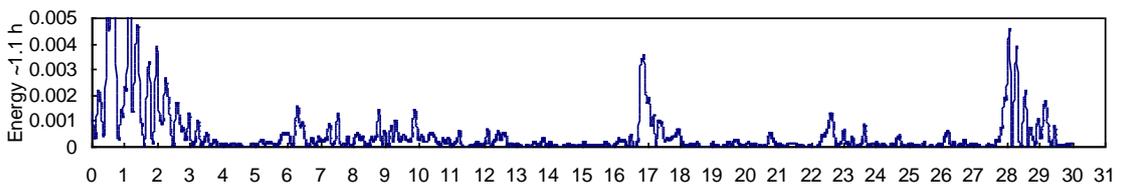
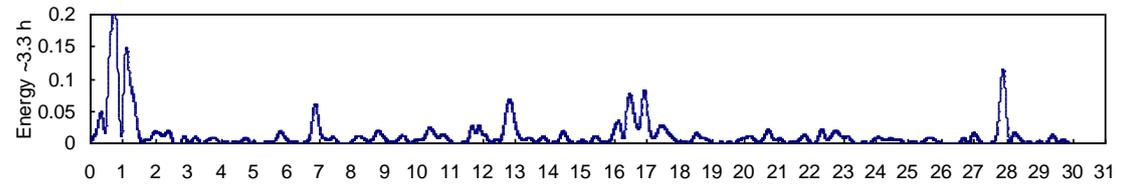
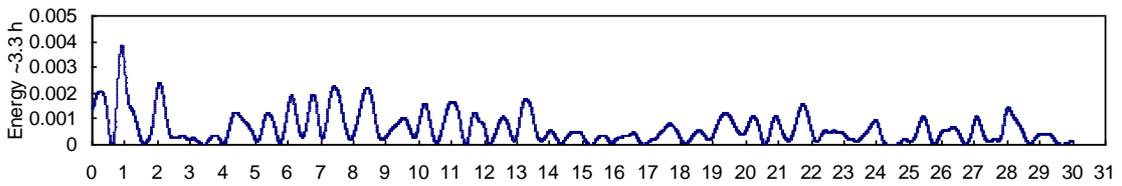
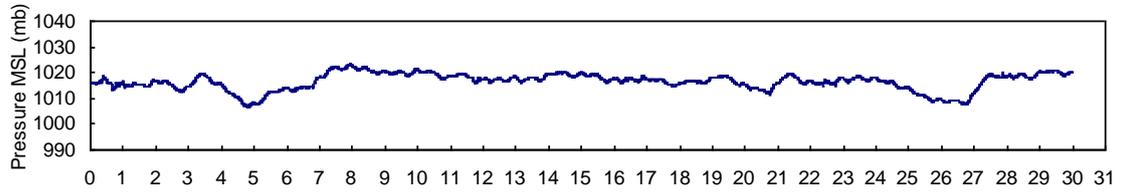
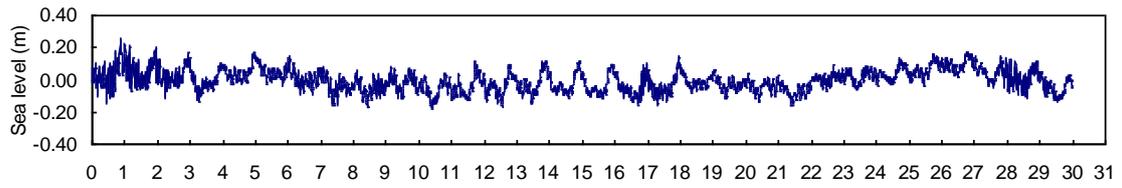
# ABR



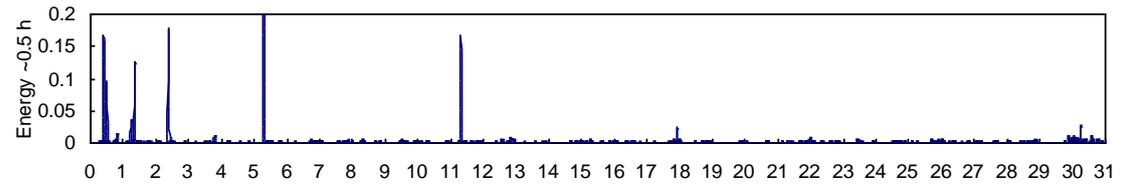
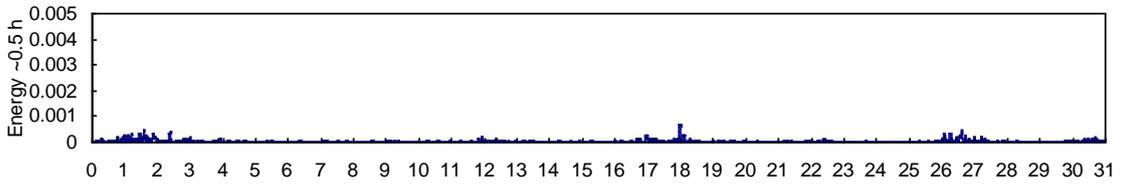
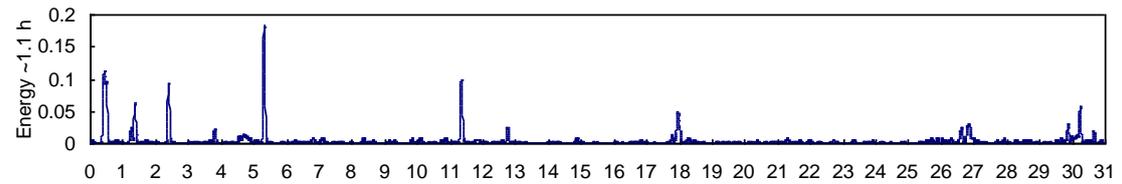
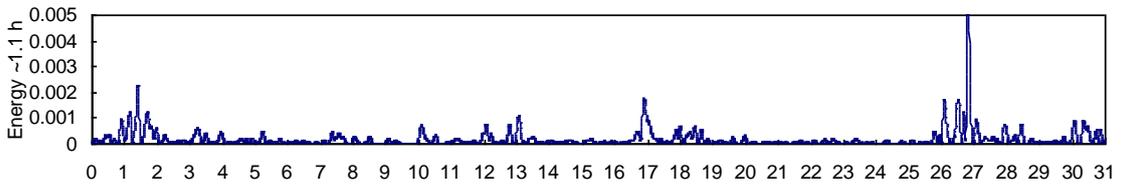
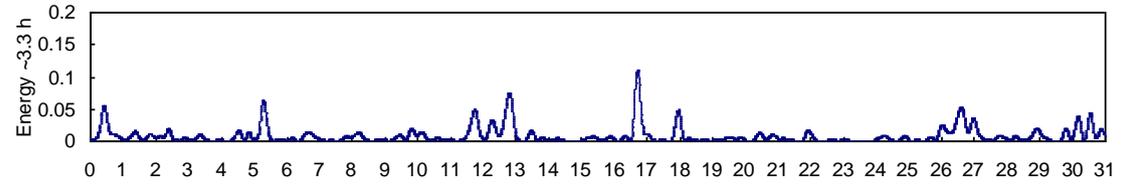
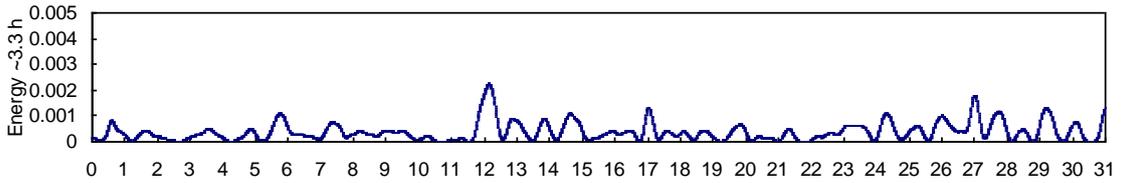
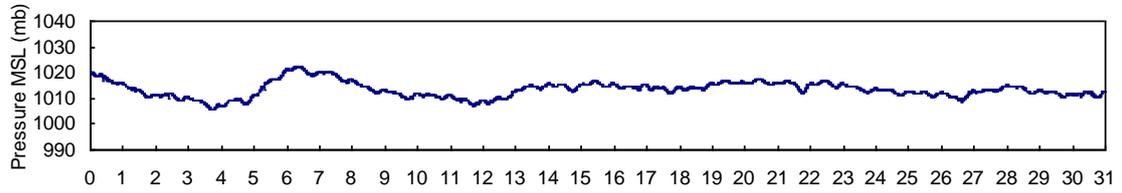
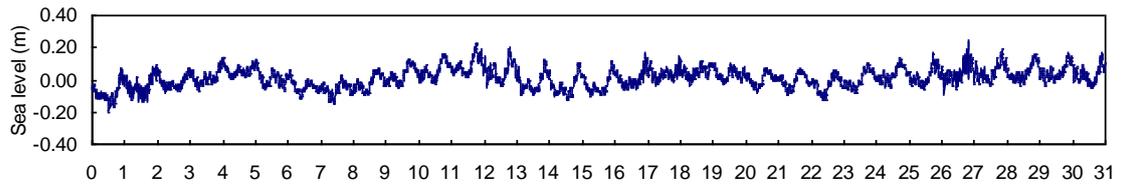
# MAY



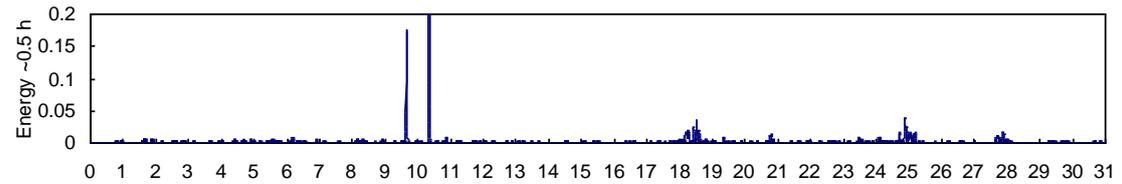
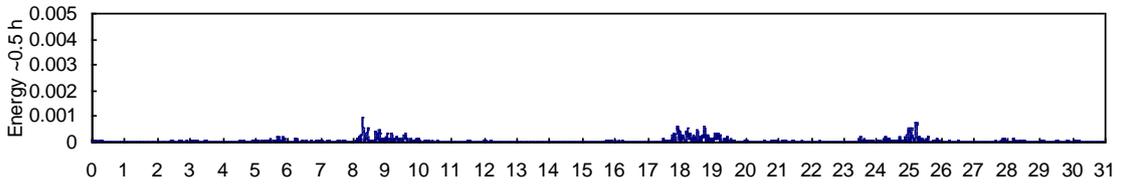
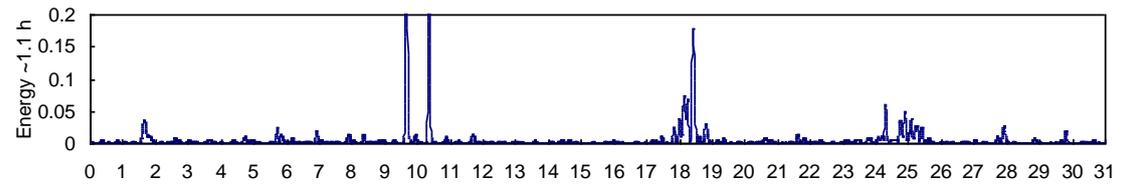
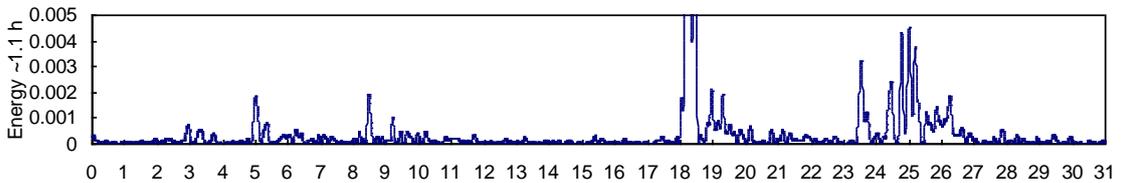
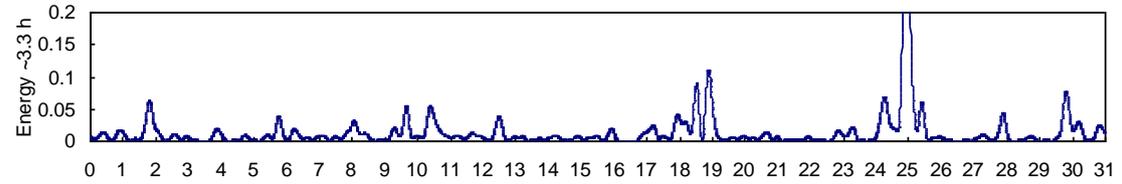
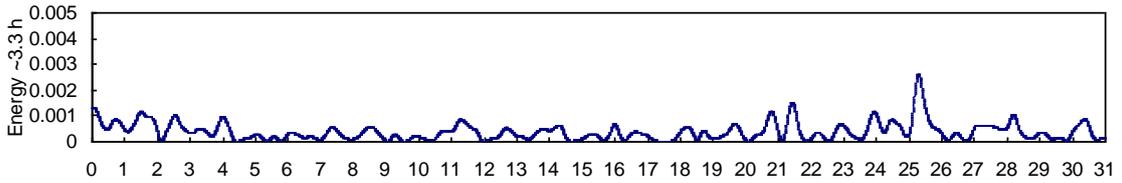
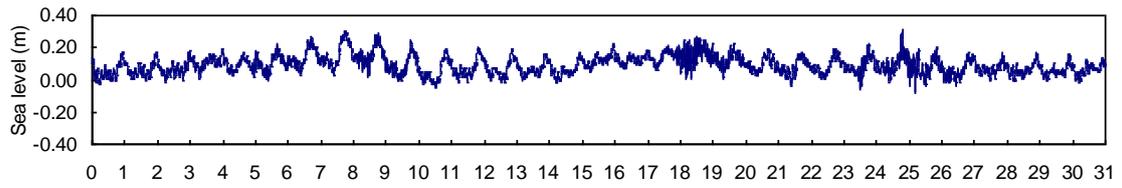
# JUN



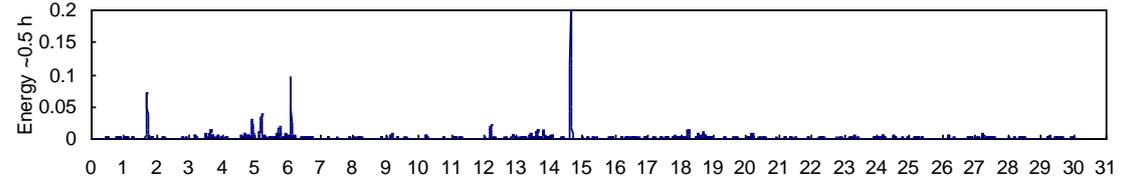
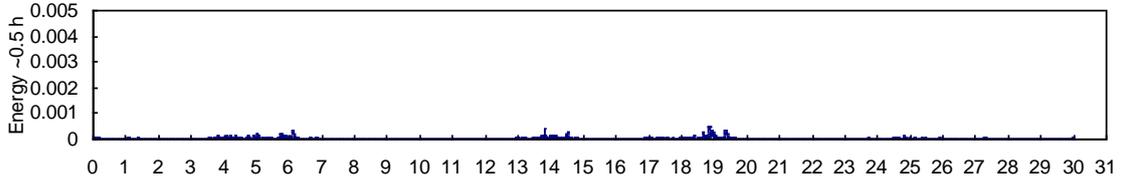
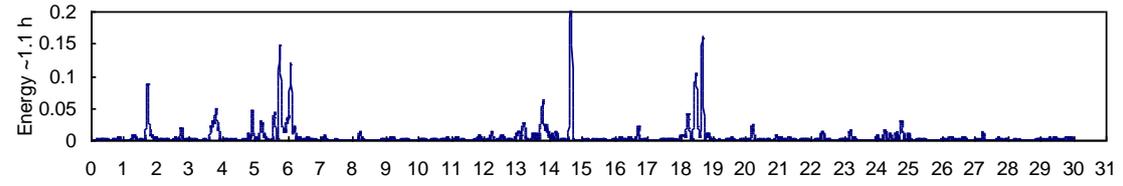
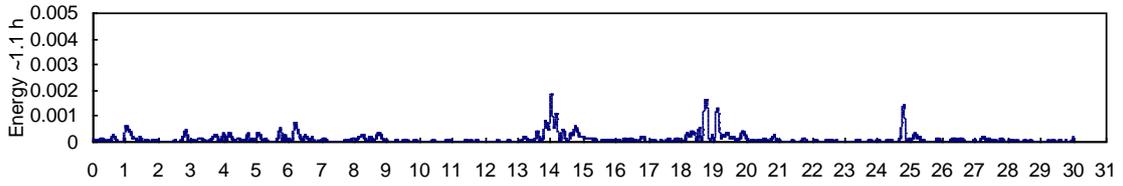
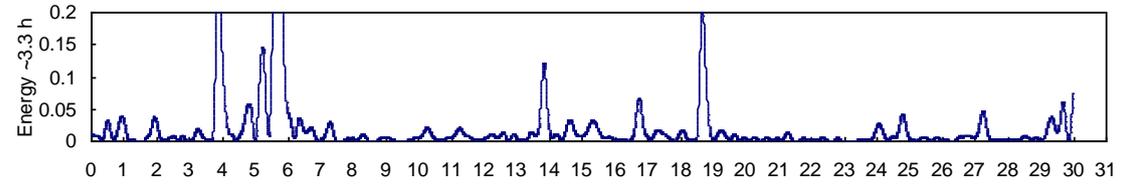
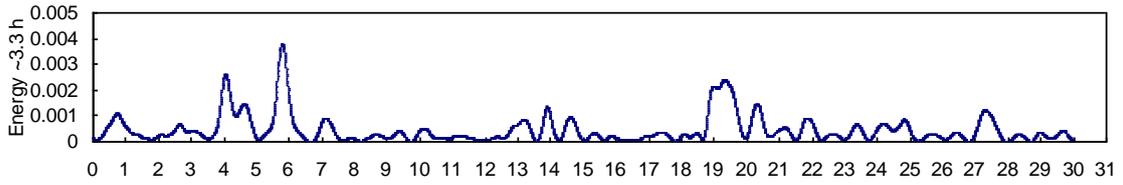
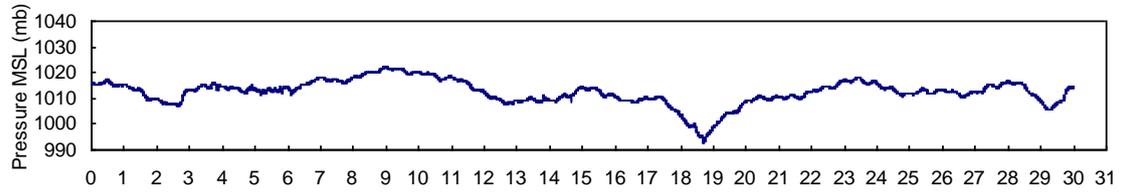
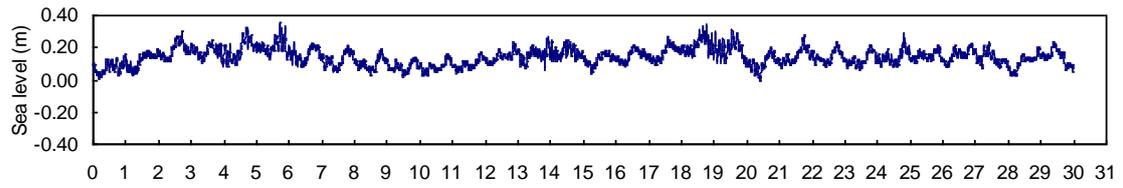
JUL



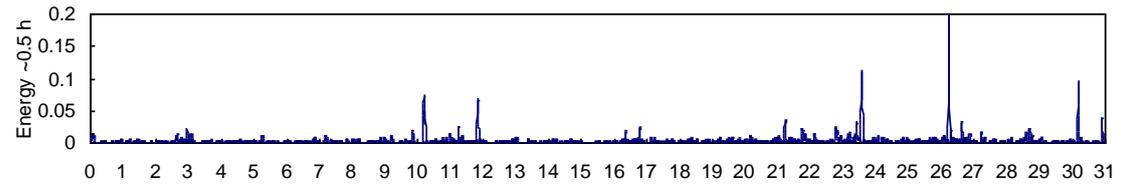
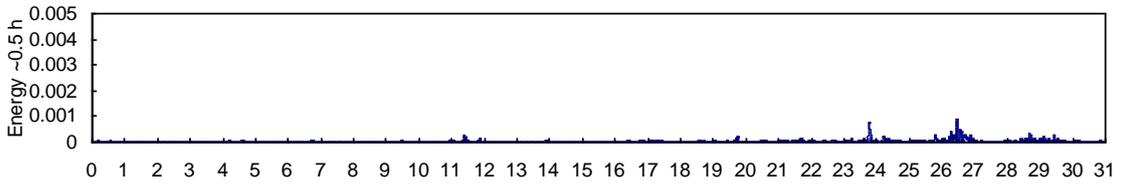
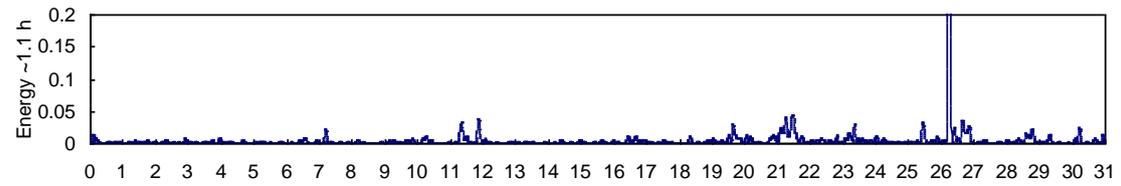
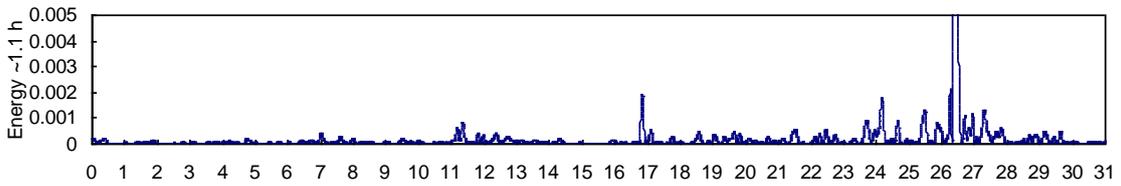
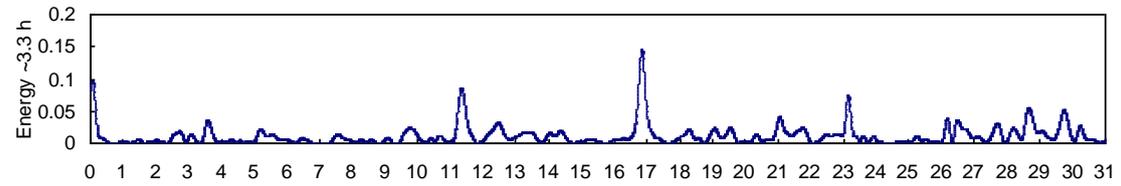
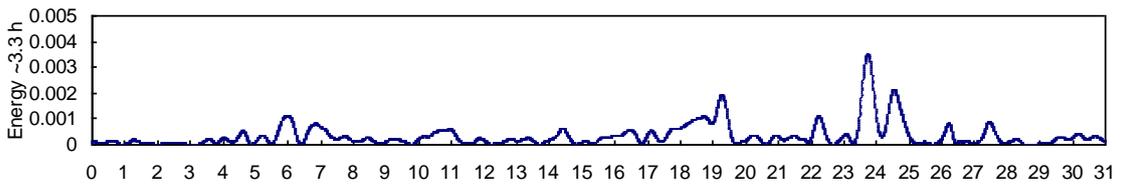
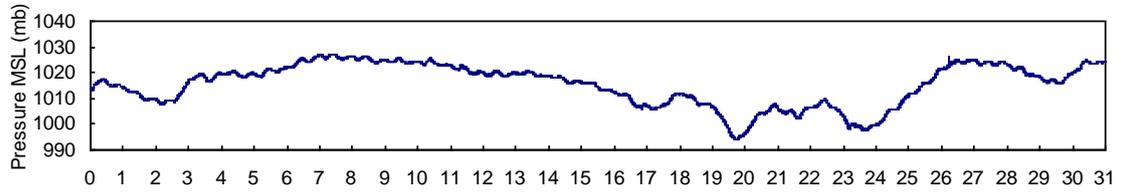
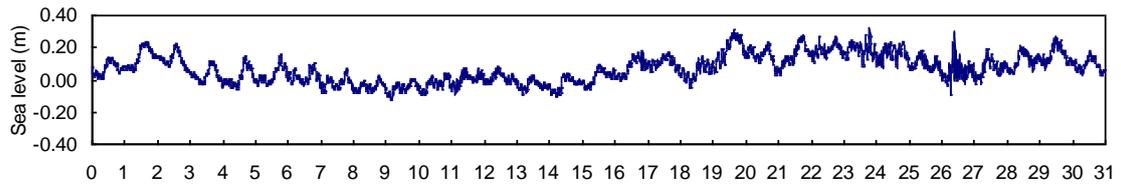
# AGO



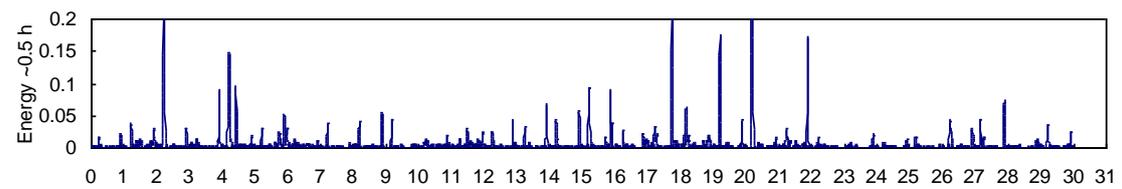
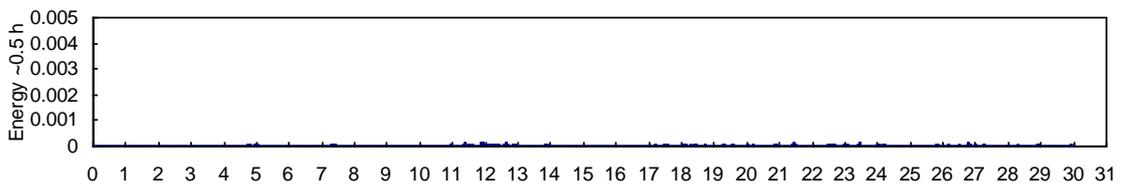
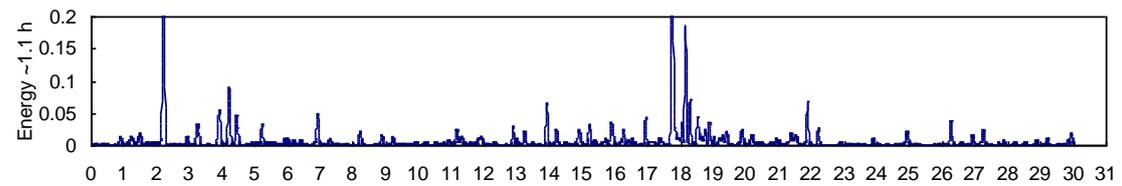
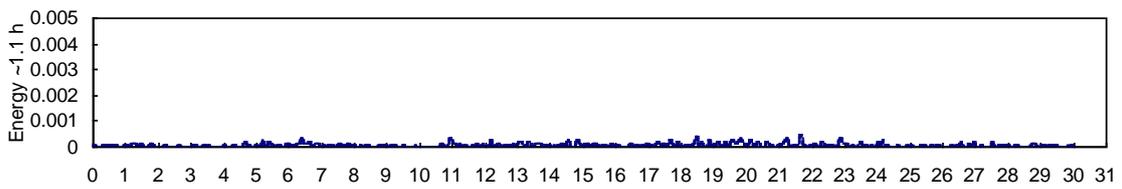
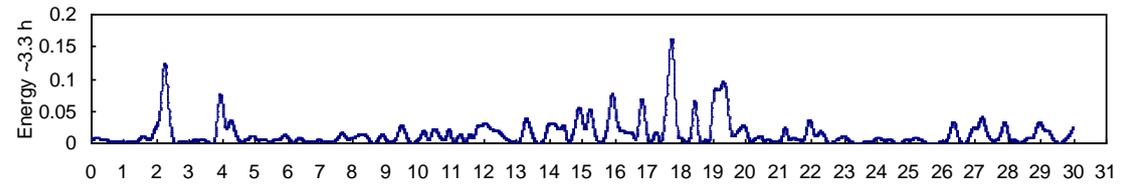
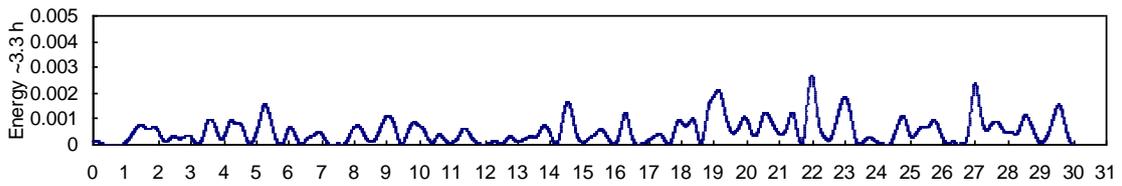
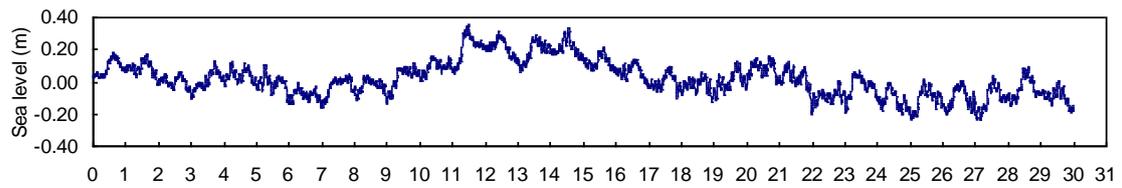
# SEP



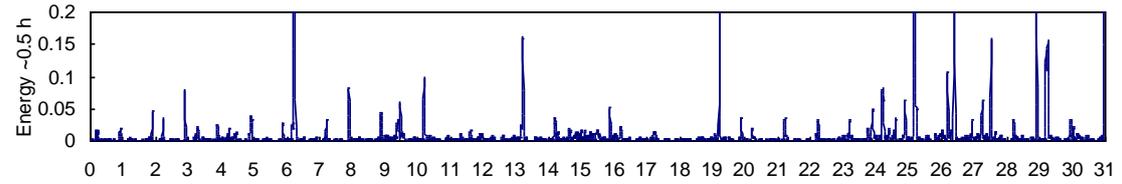
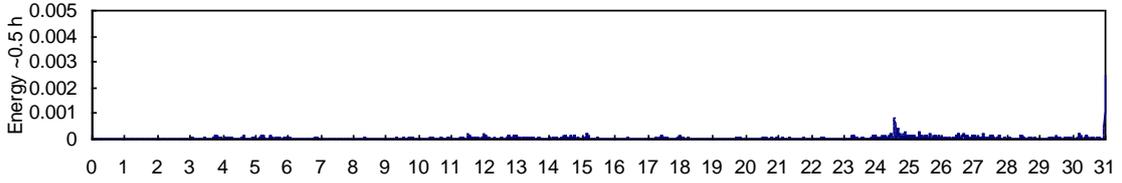
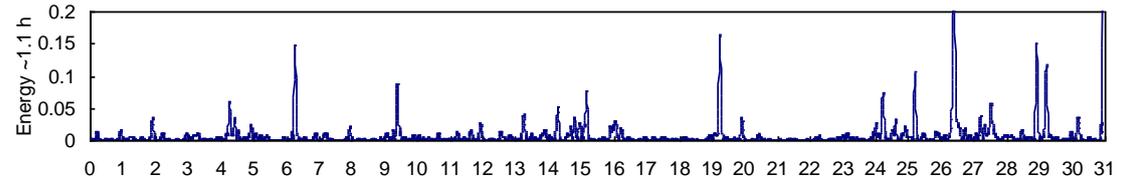
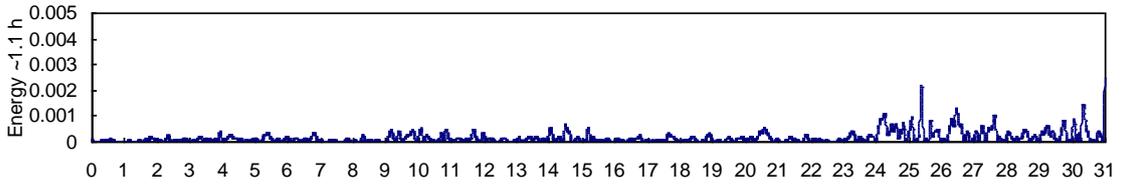
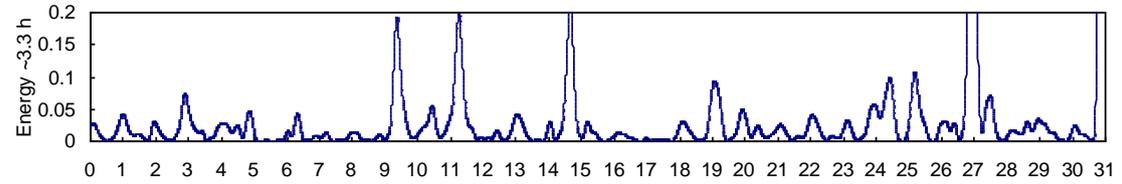
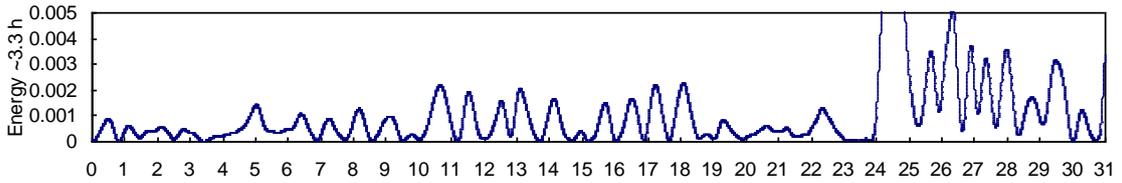
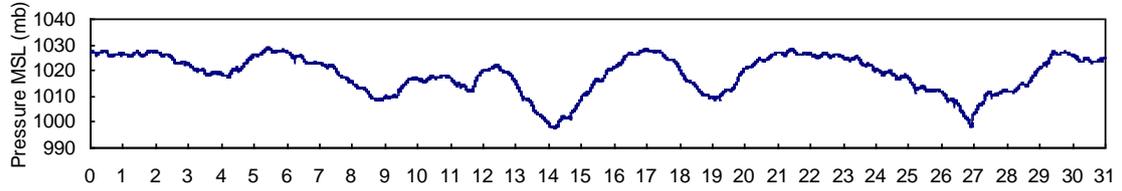
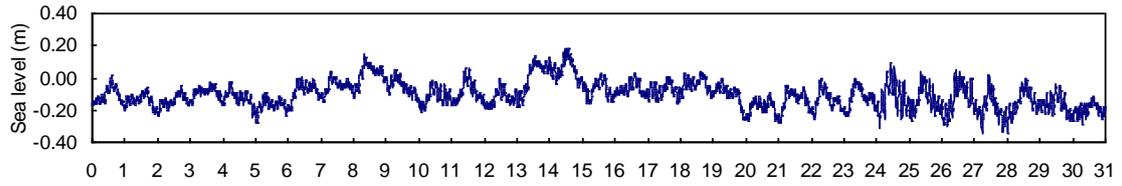
# OCT



# NOV

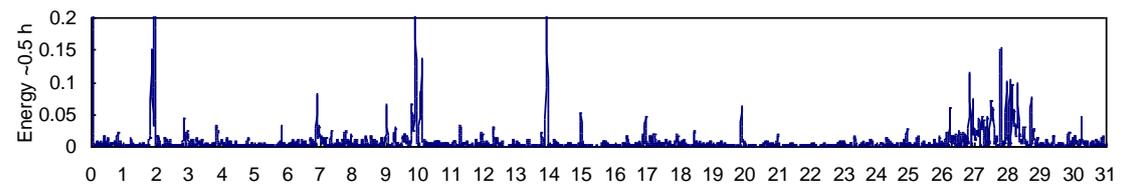
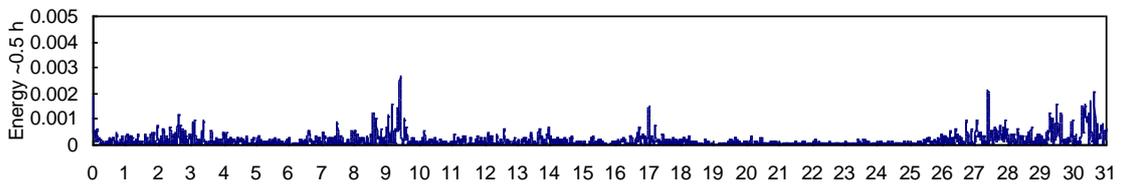
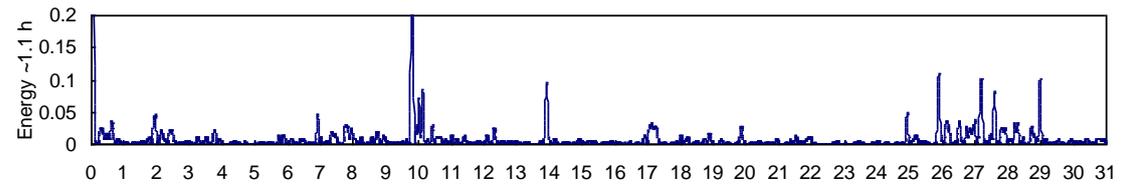
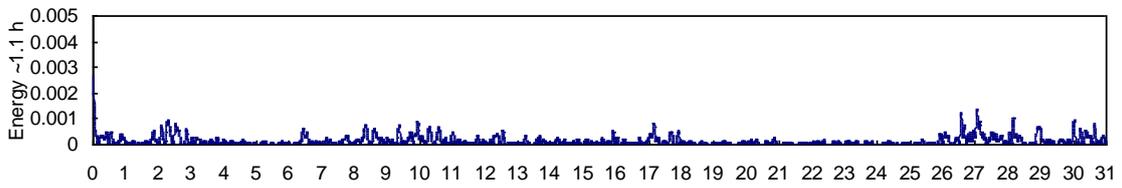
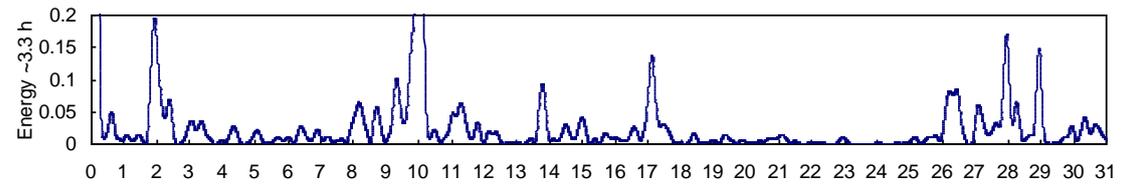
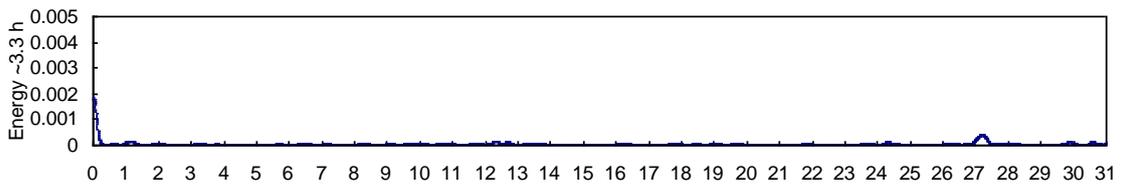
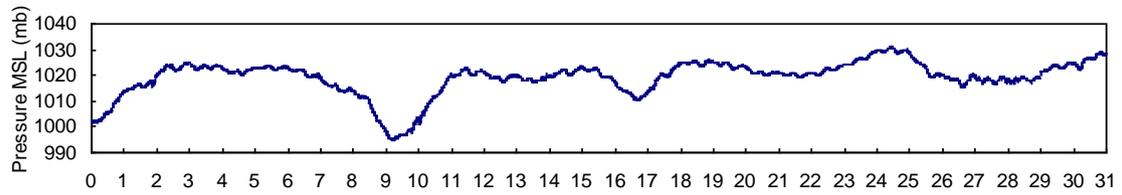
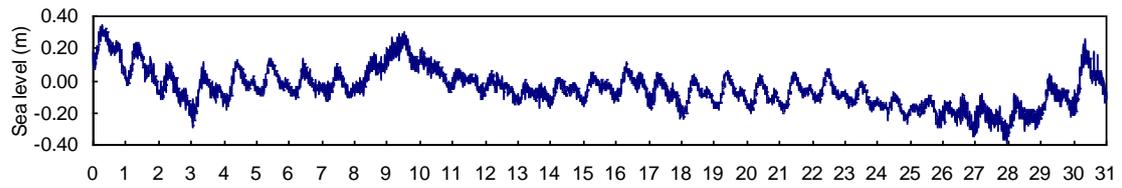


# DIC

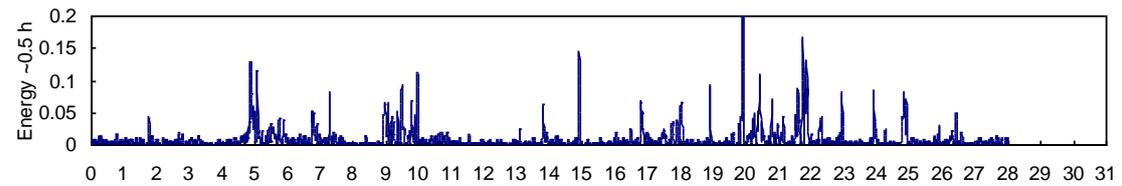
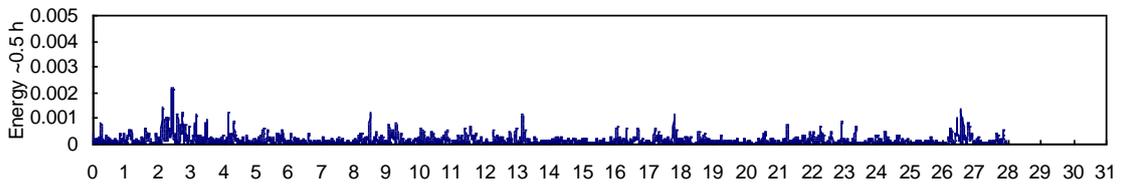
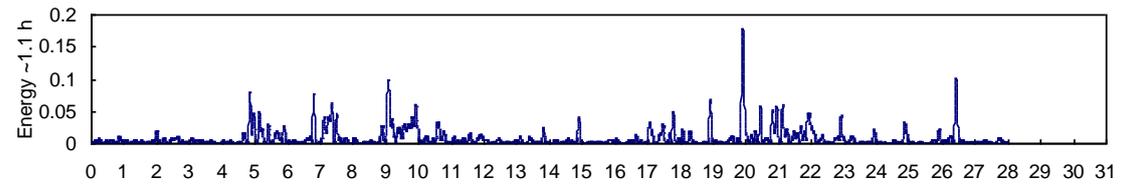
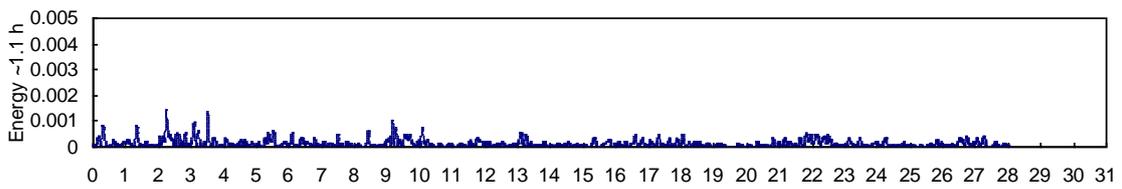
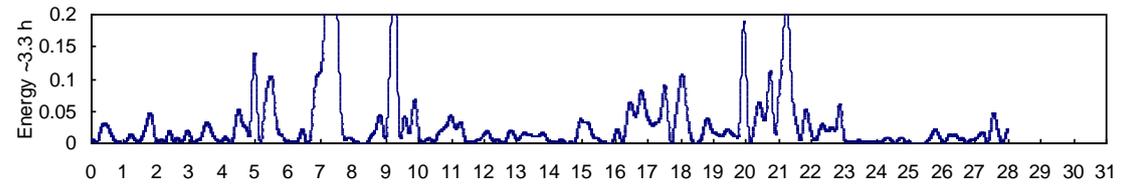
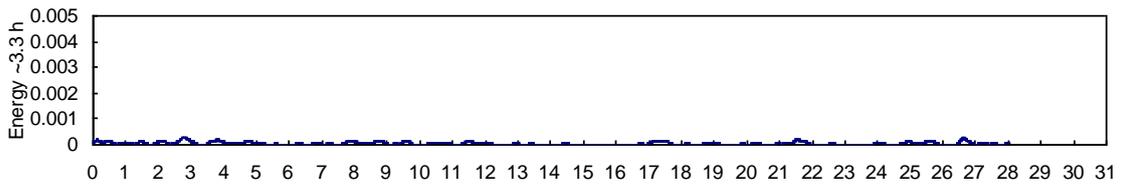
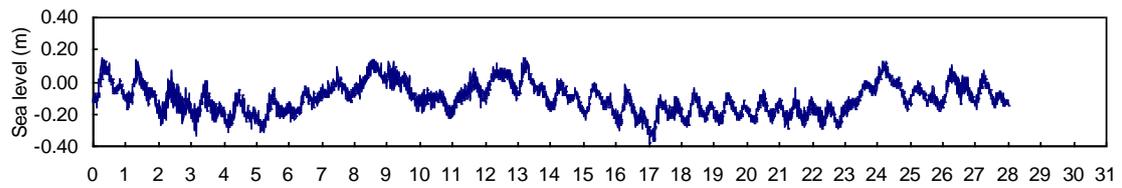


# L'AMPOLLA

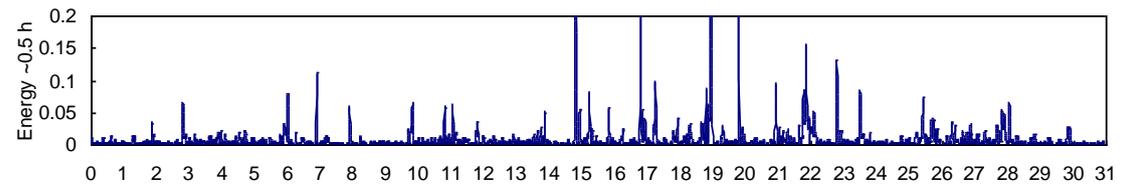
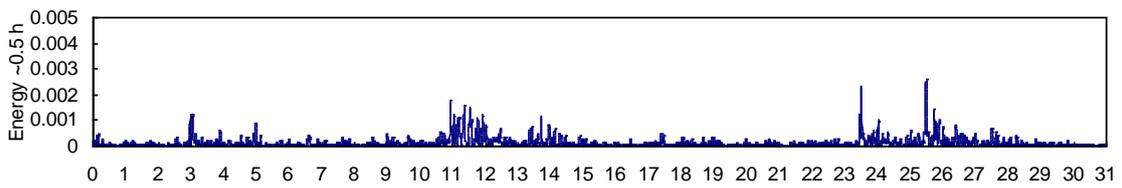
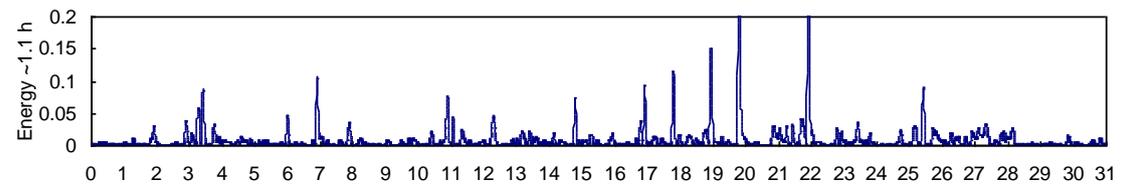
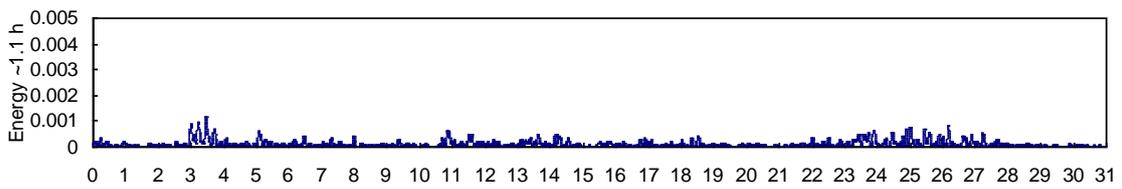
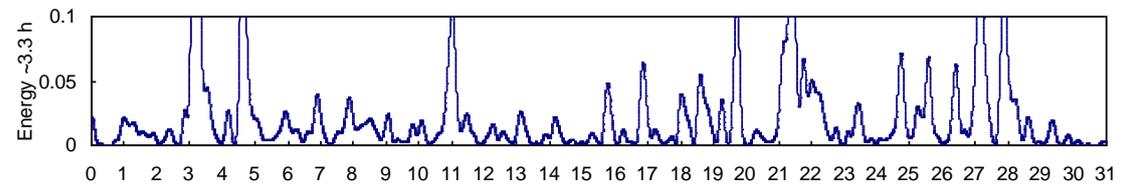
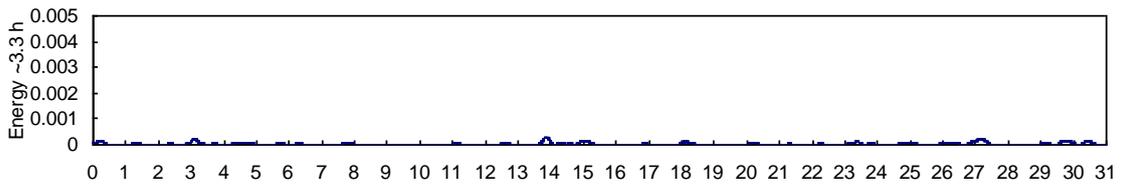
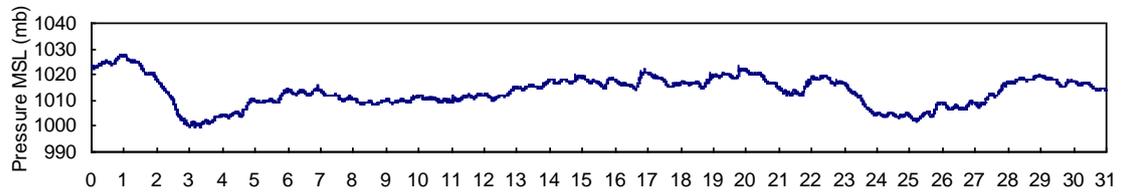
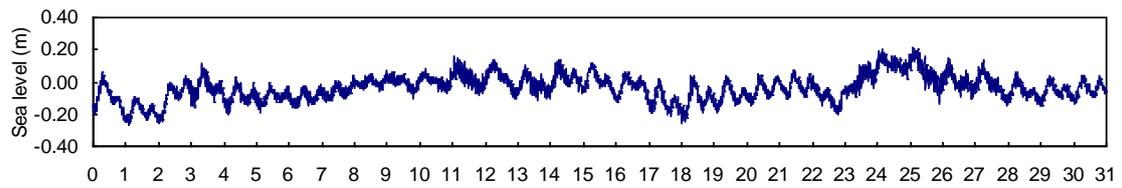
ENE



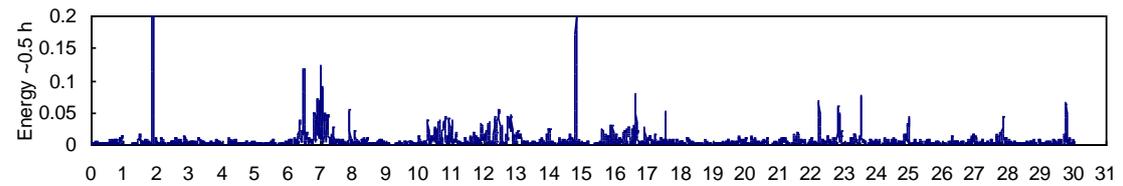
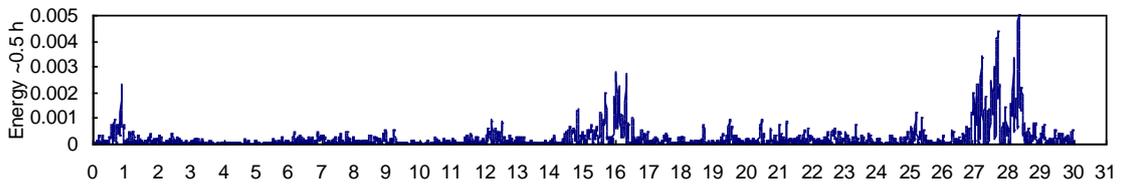
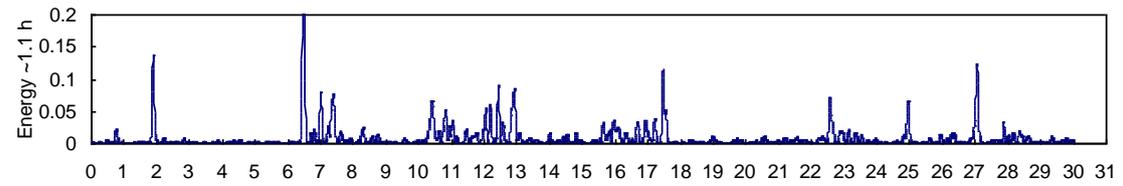
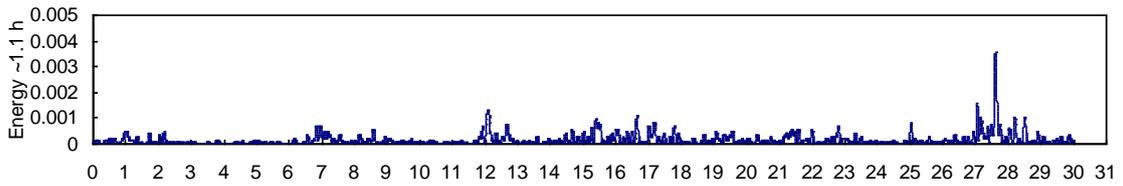
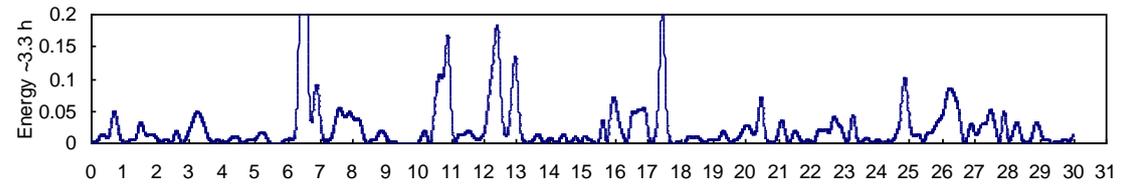
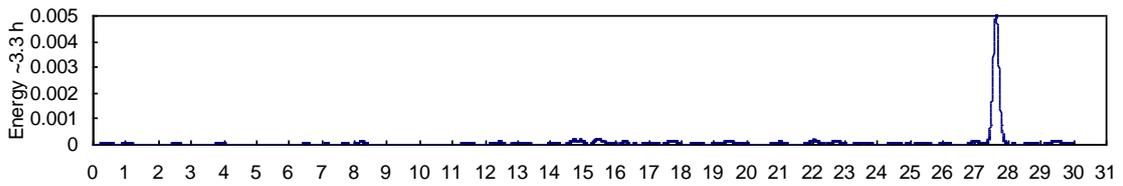
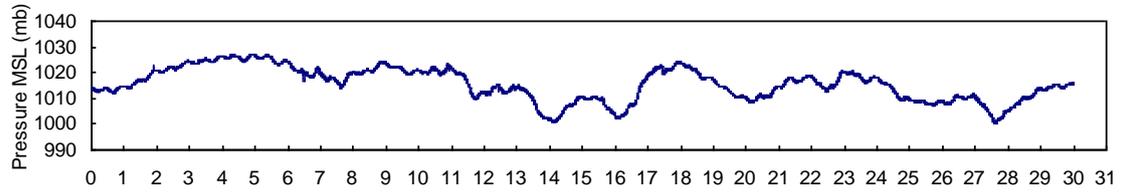
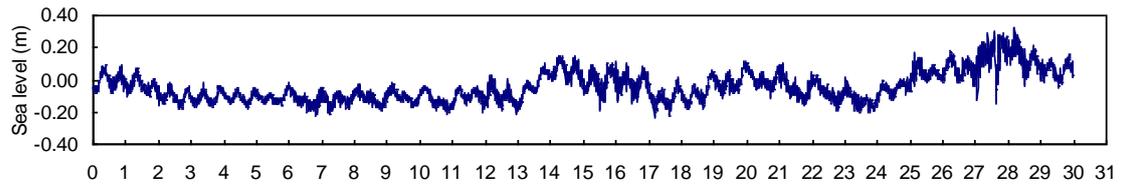
# FEB



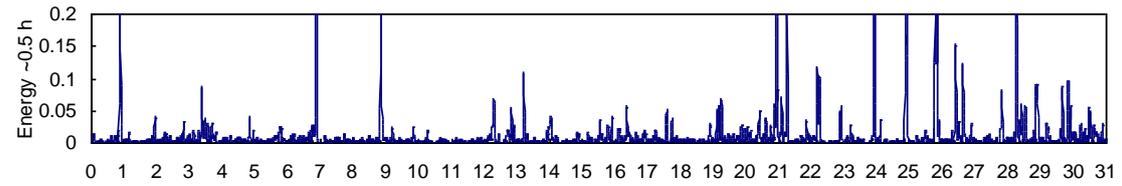
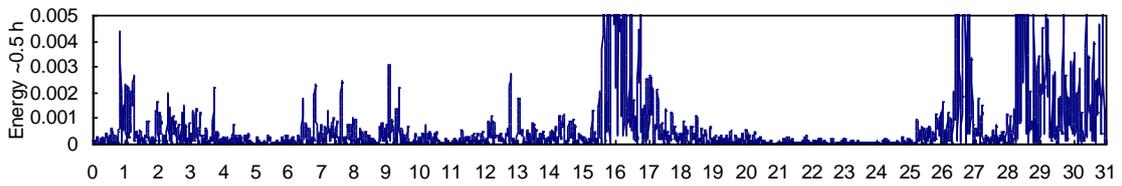
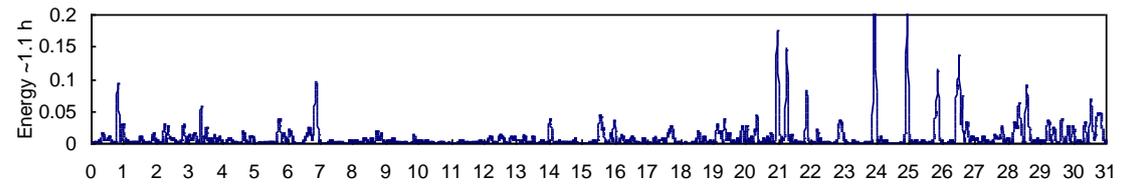
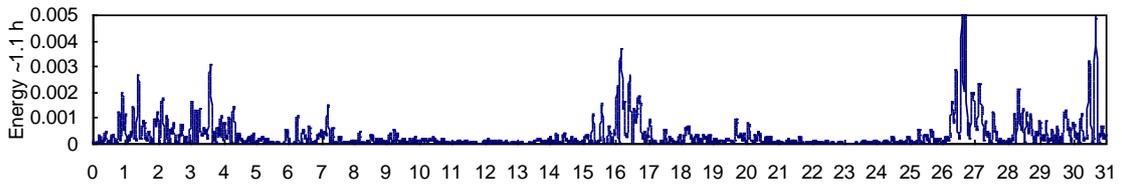
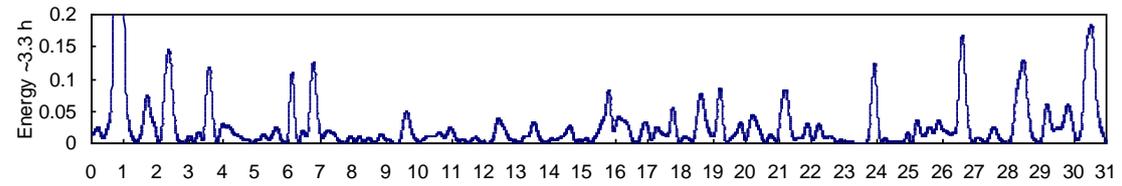
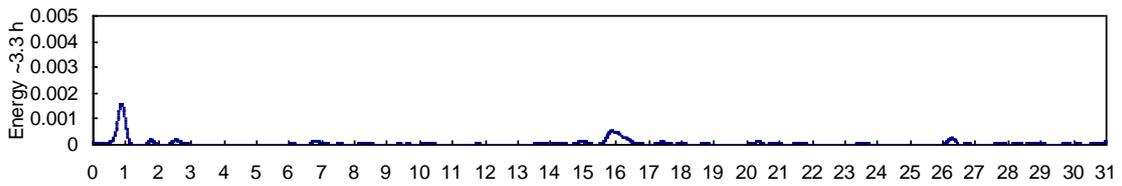
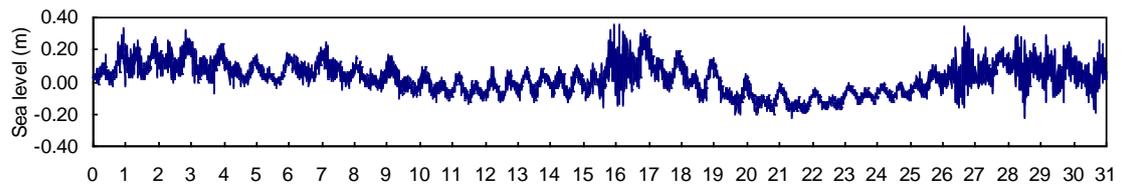
# MAR



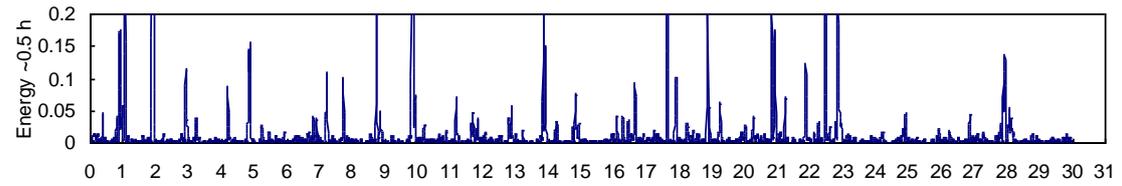
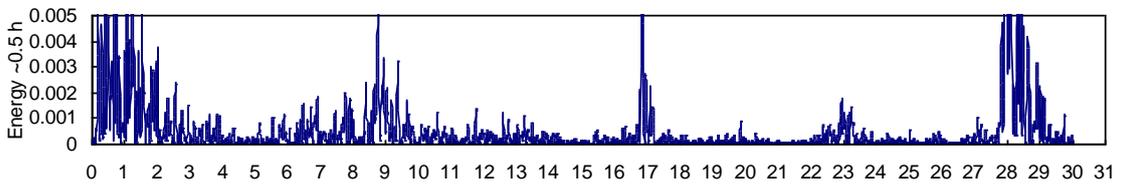
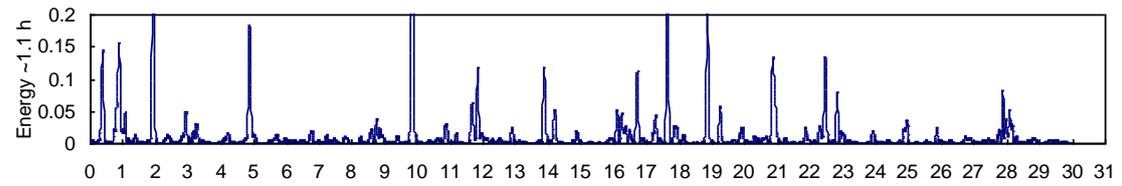
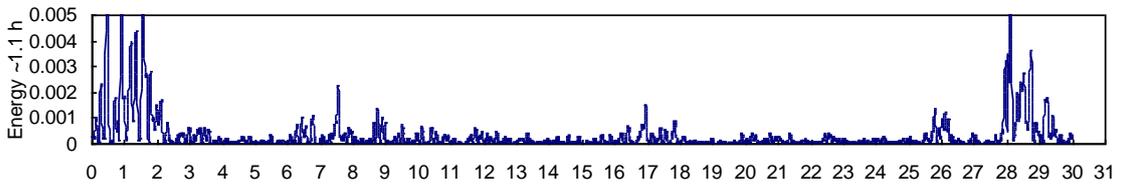
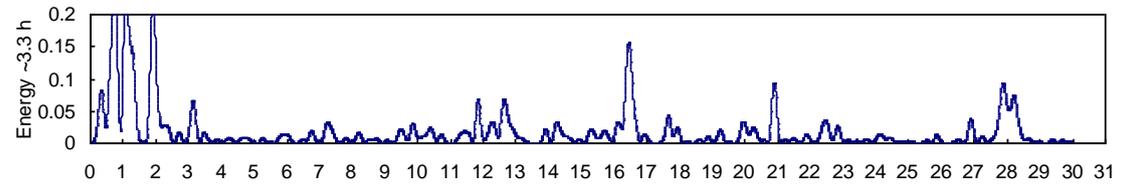
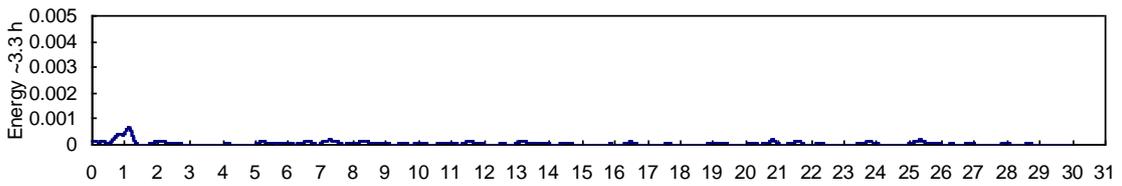
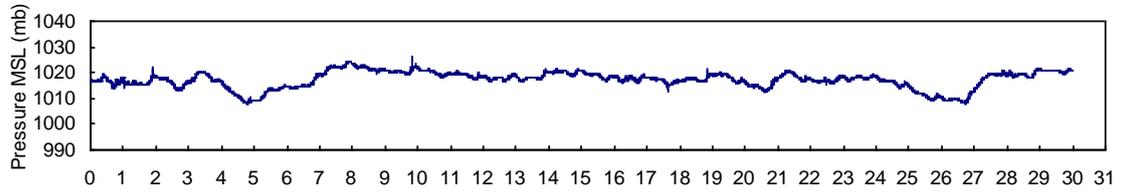
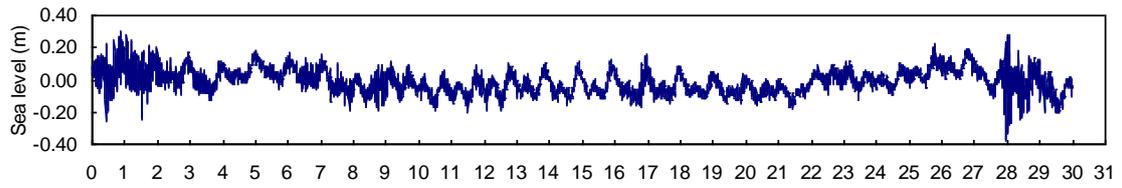
# ABR



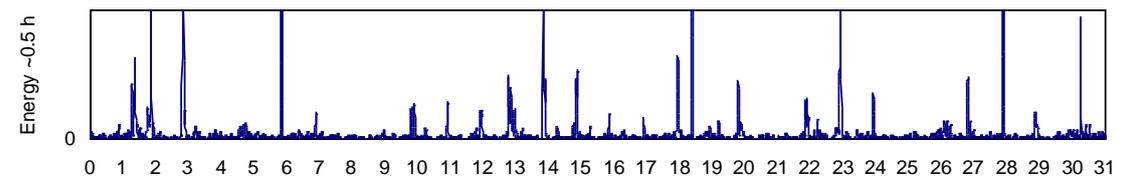
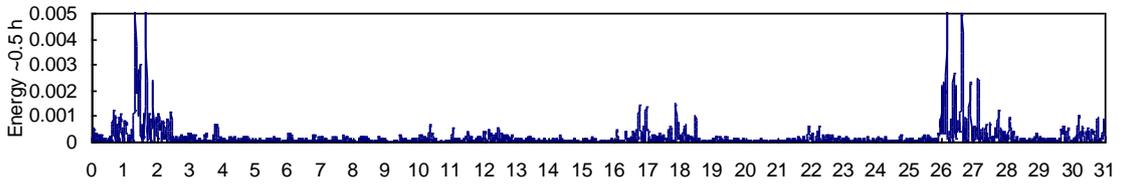
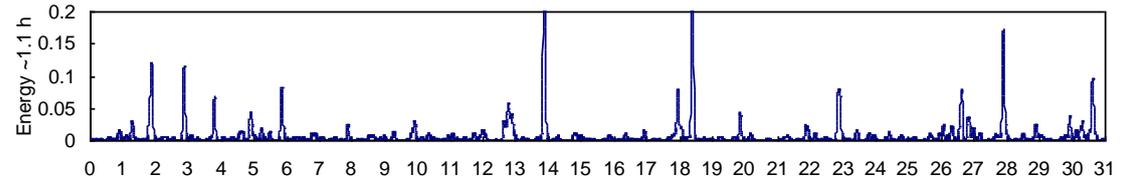
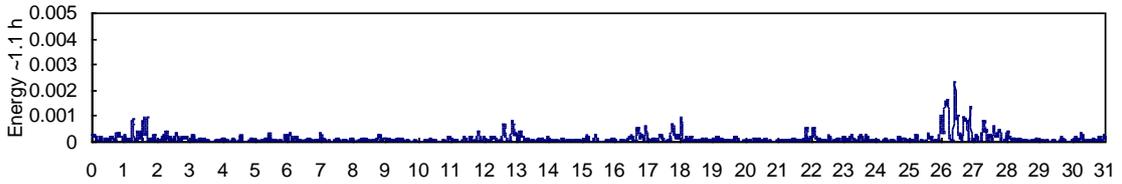
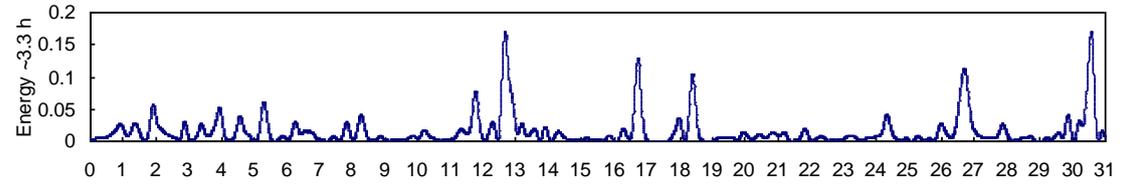
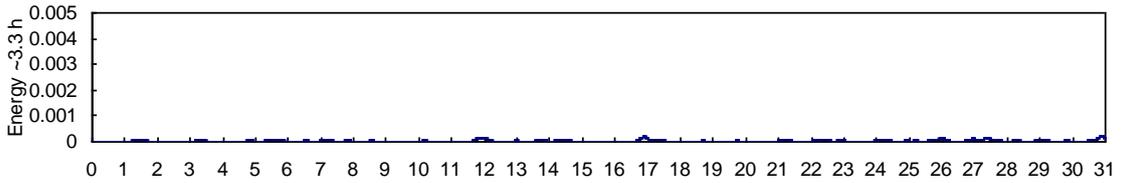
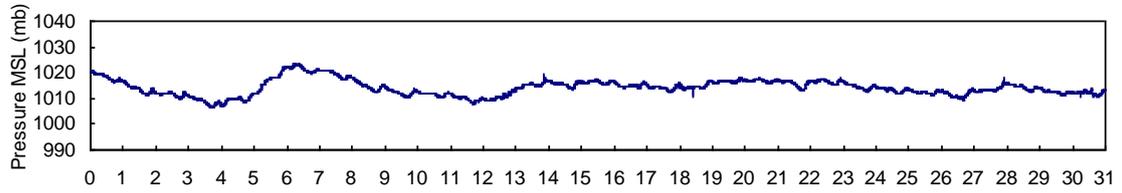
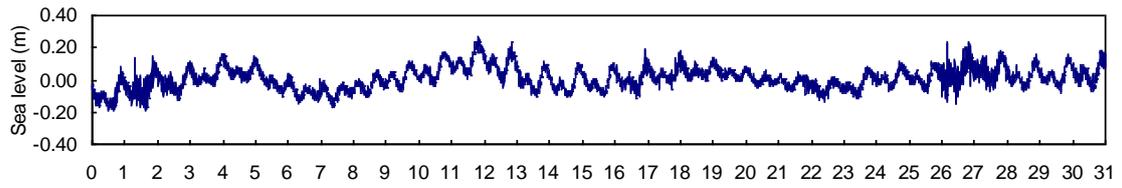
# MAY



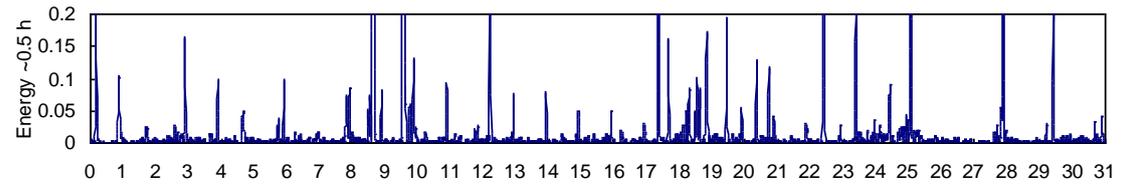
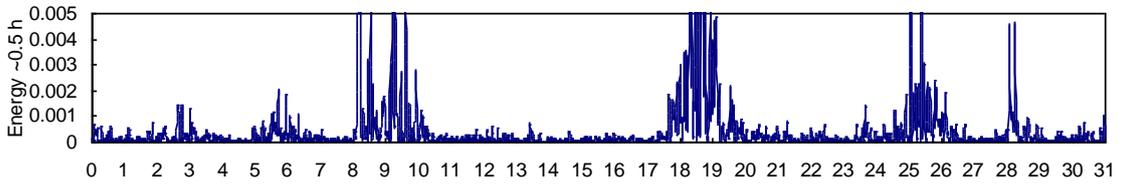
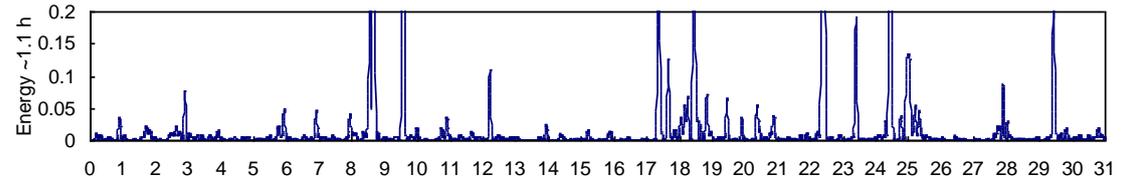
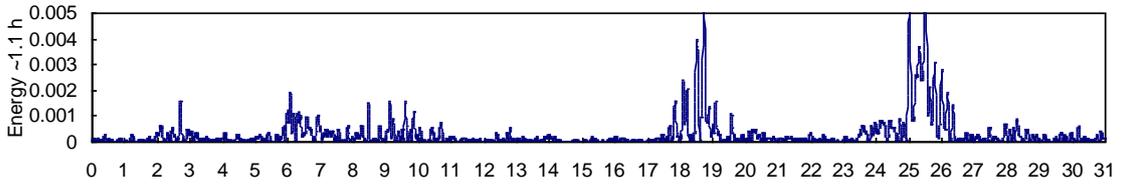
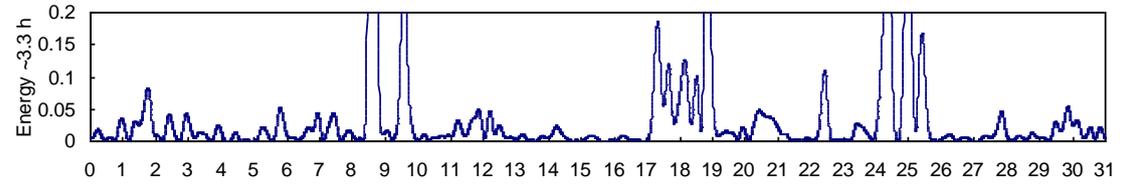
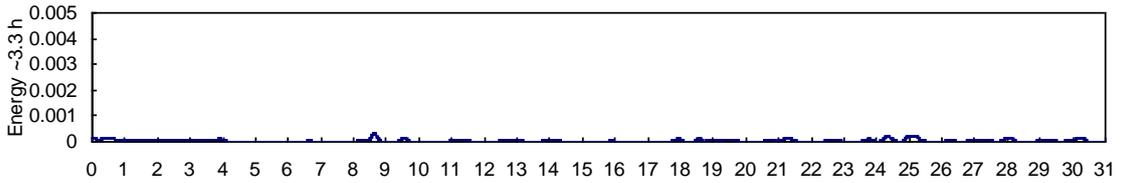
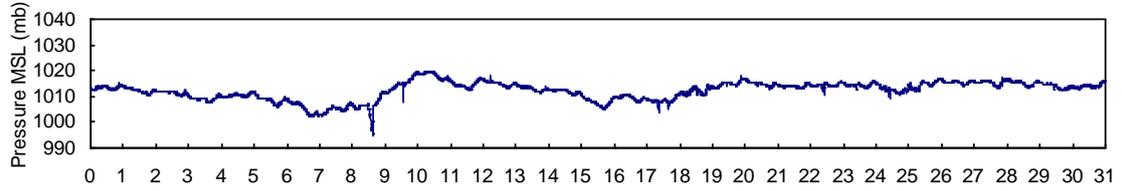
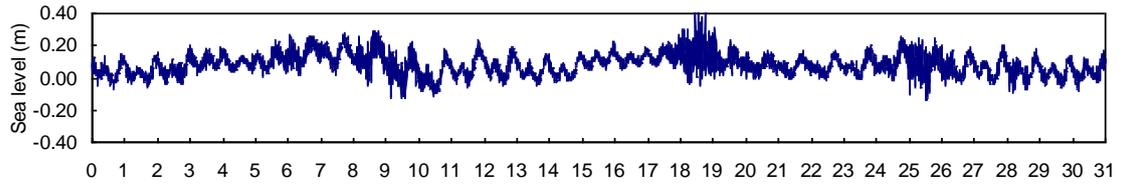
# JUN



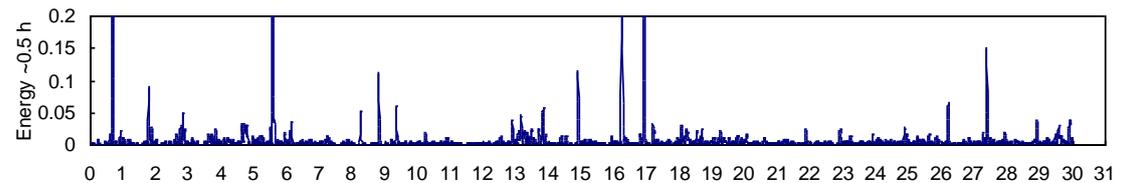
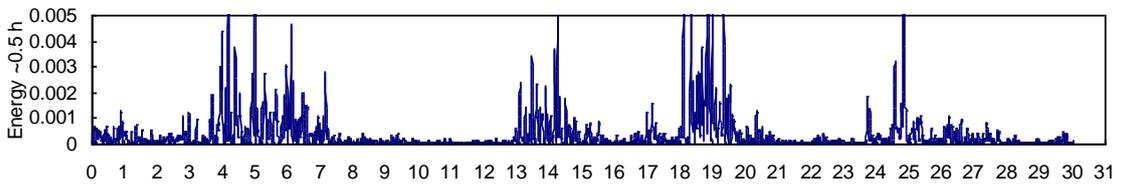
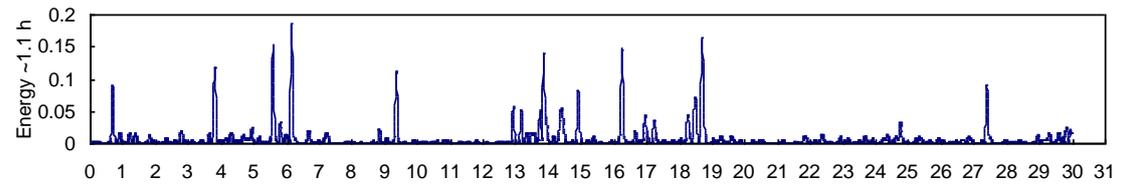
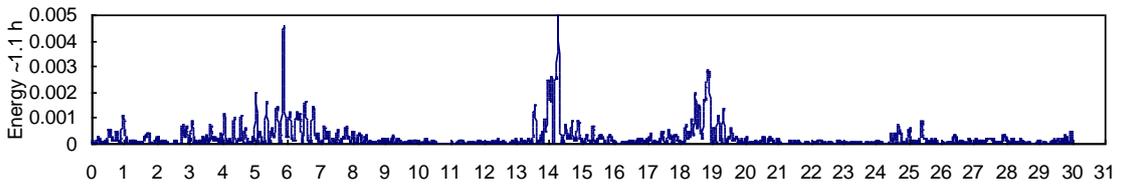
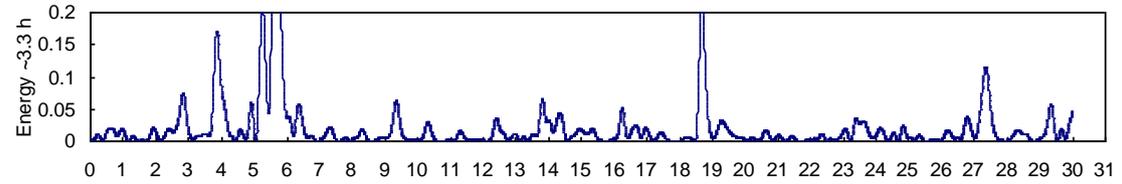
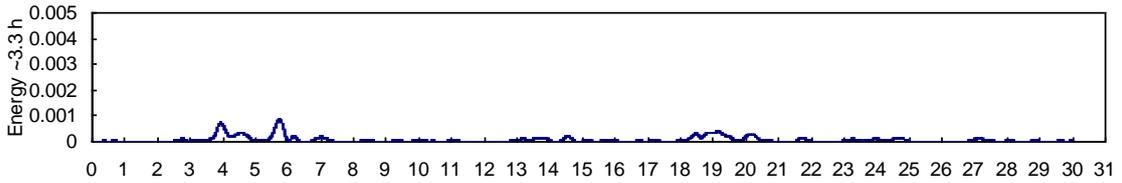
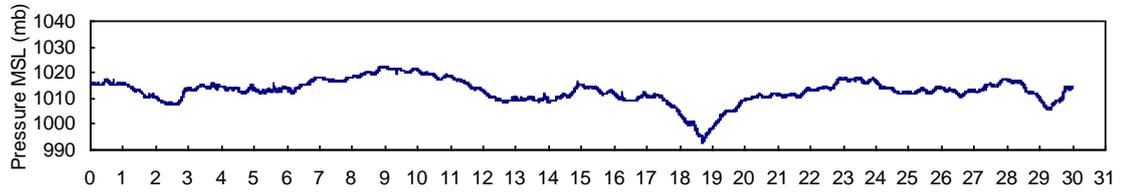
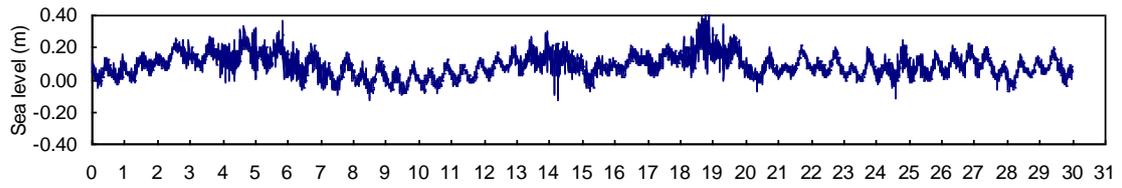
JUL



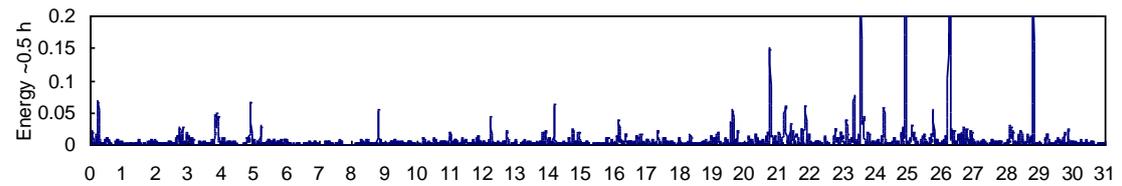
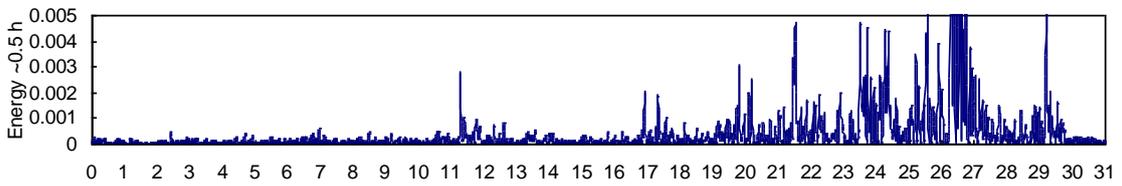
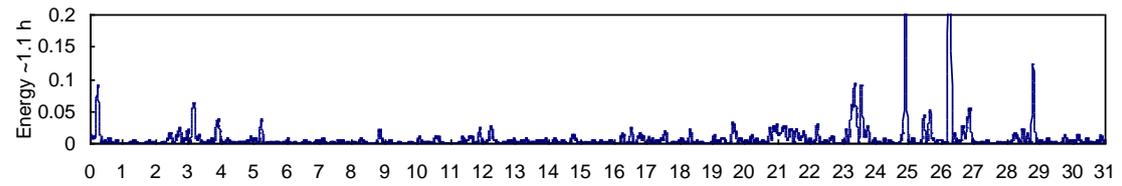
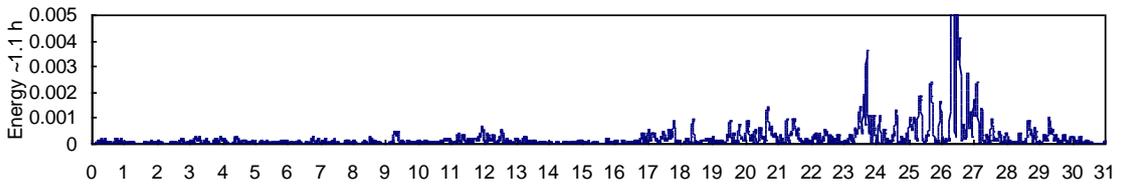
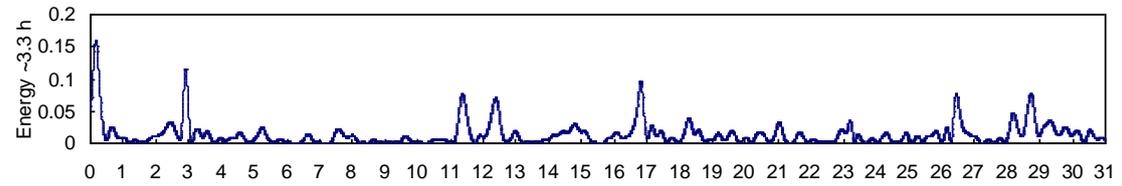
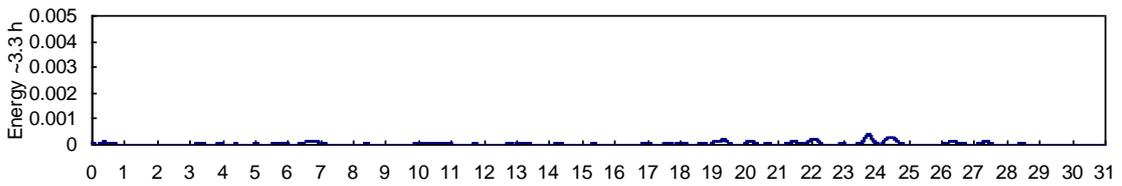
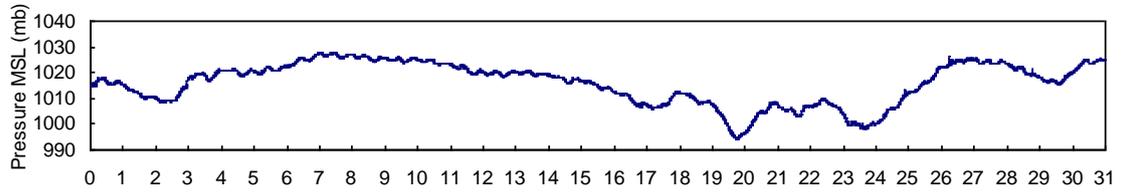
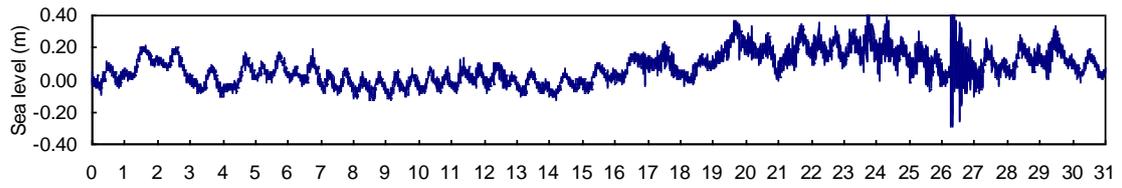
AGO



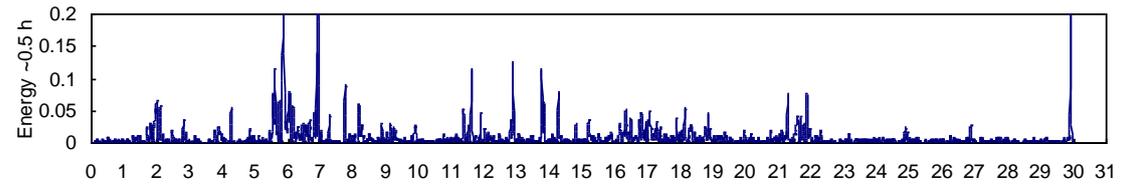
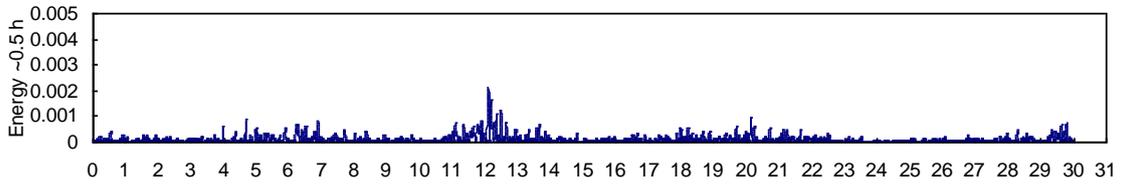
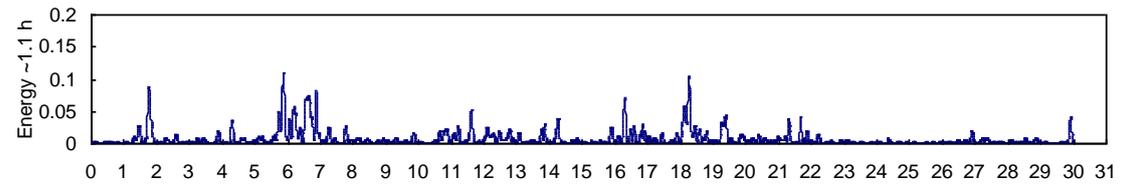
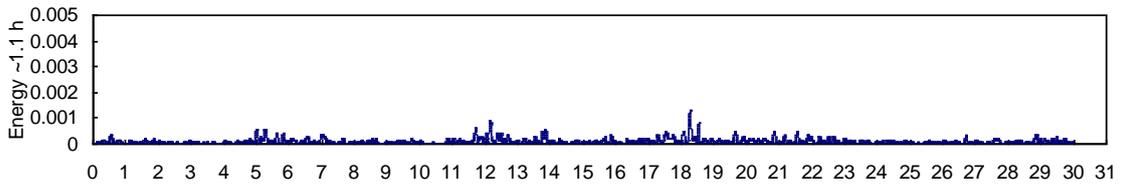
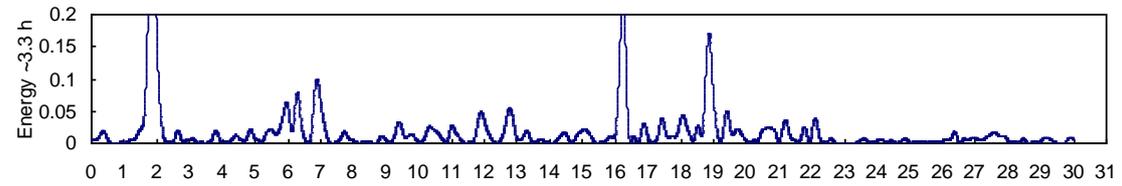
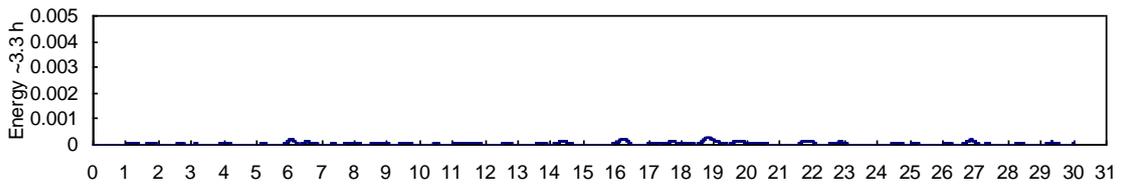
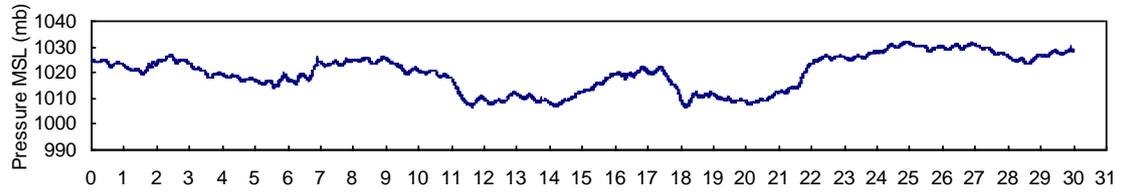
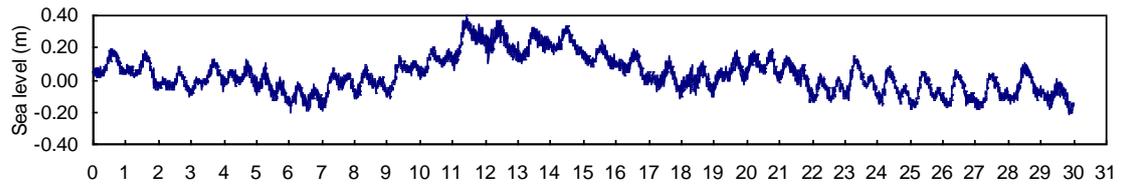
# SEP



# OCT



# NOV



# DIC

