

## FOTOGRAFÍAS ZONA I

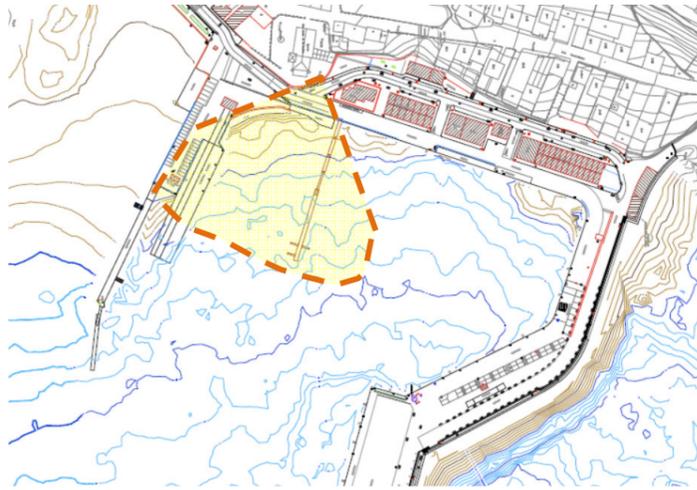


Foto 3. Zona de la pasarela a retirar de Laxe, A Coruña



Foto 4: Pasarela a retirar para realizar el dragado del puerto de Laxe, A Coruña



Foto 5: Detalle inicio de pasarela. Laxe, A Coruña

## FOTOGRAFÍAS ZONA II

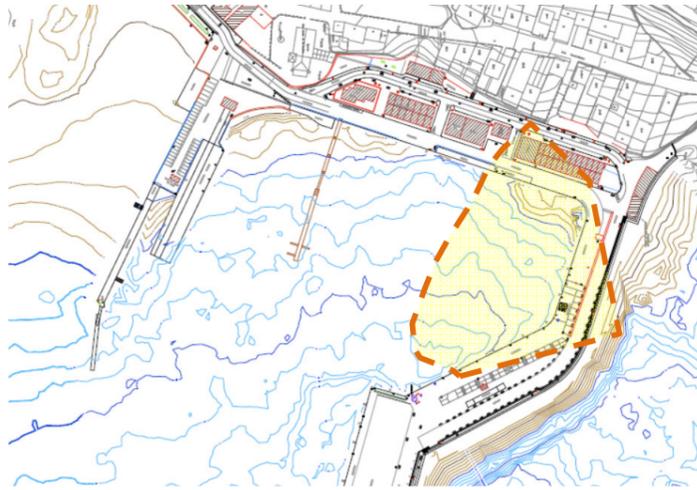


Foto 6. Zona de actuación de precorte. Laxe, A Coruña



Foto 7. Panorámica de la dársena a dragar. Laxe, A Coruña

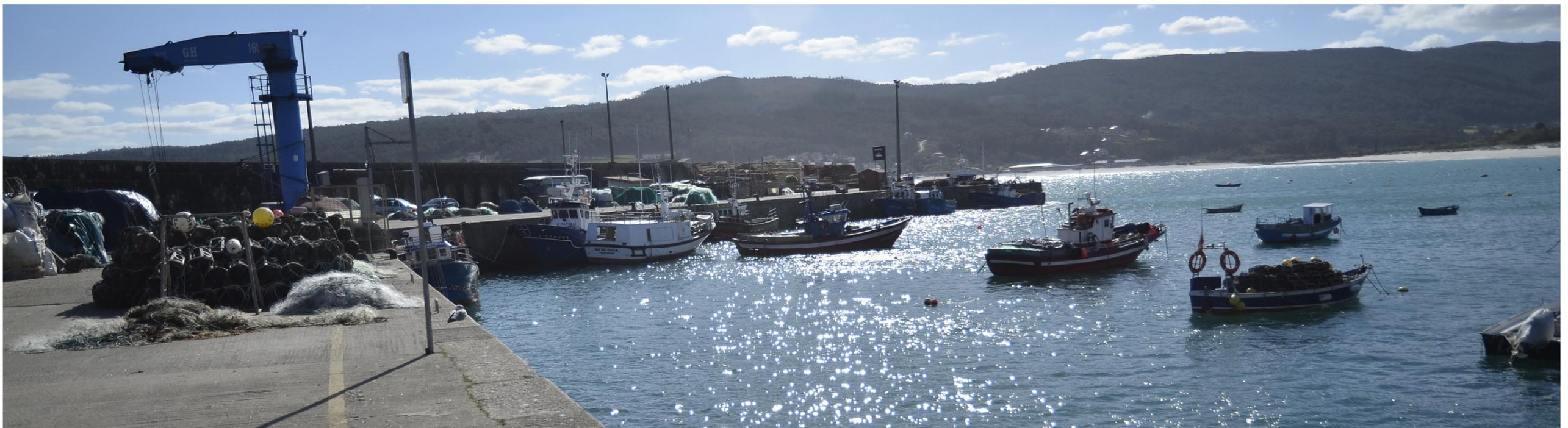


Foto 8. Dársena interior dique de abrigo. Laxe, A Coruña

## FOTOGRAFÍAS GENERALES



Foto 9. Vista general de la dársena. Laxe, A Coruña



Foto 8. Área de carga de combustible de la dársena. Laxe, A Coruña



## ÁREA DE INFRAESTRUTURAS, MEDIO AMBIENTE Y SEGURIDAD

---

TÍTULO DEL PROYECTO  
**DRAGADO EN EL PUERTO DE LAXE**

PUERTO  
**LAXE (A CORUÑA)**

### ANEJO Nº 3: ANALISIS HIDRODINÁMICO

**ANEJO Nº 3: ANÁLISIS HIDRODINÁMICO**

## **ANEJO Nº 3: ANÁLISIS HIDRODINÁMICO**

### **DRAGADO EN EL PUERTO DE LAXE LAXE, A CORUÑA**

#### **RESUMEN DE LOS RESULTADOS**

Los resultados del análisis de los diferentes estudios realizados hasta la fecha pueden resumirse en las siguientes conclusiones:

- La campaña de medidas realizada durante los años 2009 y 2010 confirma los análisis previos realizados por medio de modelos matemáticos y reflejados en los informes técnicos desarrollados para Portos de Galicia.
- En la ensenada de Laxe se registra la resonancia de una onda larga de periodo básico  $T = 210$  s
- Como resultado de esta oscilación, en la dársena portuaria se generan ondas que pueden llegar a alcanzar alturas superiores a los 2 m
- La onda larga se genera en toda la ensenada de la ría, produciendo oscilaciones del conjunto, de forma que su eliminación no es posible mediante obras que se limiten a la zona portuaria.
- Los coeficientes de agitación calculados mediante modelo matemático son bastante similares a los registrados durante la campaña de medida.

Se adjuntan los estudios más significativos al respecto.



**XUNTA DE GALICIA**

CONSELLERÍA DE POLÍTICA TERRITORIAL,  
OBRAS PÚBLICAS E TRANSPORTES

ÁREA DE PROXECTOS E OBRAS



COD.CON.: 2008-001747

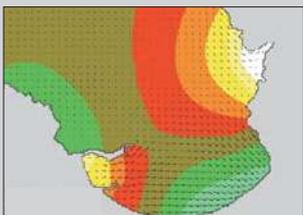
COD.INF.: 2008/025



# ESTUDO DE ALTERNATIVAS PARA A MELLORA DO PORTO DE LAXE E A SÚA AFECCIÓN A PRAIA

**Informe Final**

**Agosto 2008**



Conforme al Sistema de Gestión de la empresa HIDTMA, S.L., según las normas EN-UNE-ISO 14001 y EN-UNE ISO 9001, el presente trabajo,

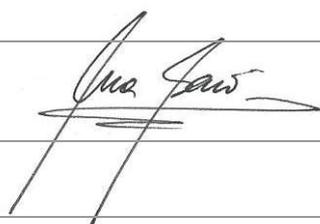
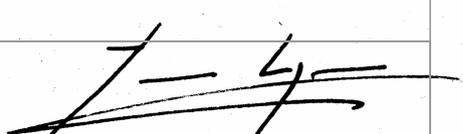
<b>TÍTULO DEL INFORME / PROYECTO:</b> <b><i>Estudo de alternativas para a mellora do Porto de Laxe e a súa afección a praia</i></b>
<b>2008/025 CÓDIGO INFORME</b>

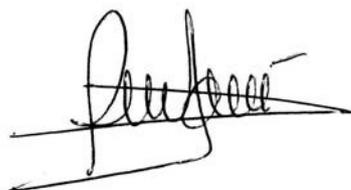
Asociado al contrato:

<b>TÍTULO DEL CONTRATO:</b> <b><i>Estudo de alternativas para a mellora do Porto de Laxe e a súa afección a praia</i></b>
<b>2008-001747 CÓDIGO CONTRATO</b>

ha sido realizado siguiendo los Procedimientos de Calidad y Medio Ambiente del Sistema de Gestión.

Este Documento ha sido:

<b>Revisado por: Ana Baró Ollero</b>	<b>Aprobado por: Javier Enríquez</b>
<b>Fecha: Agosto de 2008</b>	<b>Fecha: Agosto de 2008</b>
<b>Firma:</b> 	<b>Firma:</b> 

<b>El Responsable de Calidad y Medio Ambiente</b>	 
<b>Fecha: Agosto de 2008</b>	
 <b>Fdo.: Fernando Ruiz Bauzá</b>	



## **ÍNDICE**

### **Memoria**

1. Objeto del estudio .....	1
2. Sumario y conclusiones.....	3
3. Clima marítimo .....	7
3.1. Oleaje exterior .....	7
3.2. Mareas .....	8
4. Impacto del puerto en la playa .....	10
4.1. Metodología .....	10
4.2. Aplicación a la ensenada de Laxe.....	11
4.3. Efecto de la demolición del dique .....	13
4.4. Cálculo de la tasa de transporte .....	14
5. Alternativas estudiadas .....	19
6. Análisis de ondas largas .....	22
6.1. Planteamiento .....	22
6.2. Metodología de estudio.....	24
6.3. Análisis de la situación actual .....	26
6.4. Estudio de Alternativas.....	30
6.5. Conclusiones .....	32
7. Análisis de la agitación interior .....	33
7.1. Metodología .....	33
7.2. Resultados.....	34
7.3. Cálculo de excedencias .....	34
8. Presupuestos .....	36

### **Anejos**

Anejo 1	Análisis de ondas largas: Resultados
Anejo 2	Análisis de agitación interior: Resultados
Anejo 3	Modelo bidimensional de transporte
Anejo 4	Presupuesto de las Alternativas



## **Figuras**

- Figura 1.1 Plano de situación de Laxe.
- Figura 1.2 Carta Náutica del entorno de Laxe.
- Figura 1.3 Fotografía aérea de la ensenada de Laxe.
- Figura 1.4 Batimetría del entorno de Laxe.
- Figura 3.1 Representación polar de los puntos registrados en la boya de Cabo Villano.
- Figura 3.2 Rosa de oleaje exterior. Datos WANA y WASA 22711.
- Figura 3.3 Oleajes de la Boya de Cabo Villano propagados hasta la entrada de la ría.
- Figura 3.4 Rosa de oleaje propagado hasta la entrada de la ría de Laxe y tabla del régimen direccional local.
- Figura 3.5 Distribución del rango de marea en el Puerto de A Coruña.
- Figura 3.6 Distribución del nivel medio del mar en el Puerto de A Coruña.
- Figura 4.1 Ajuste de la playa a curvas teóricas. Año 1956.
- Figura 4.2 Basculamiento de la playa de Laxe tras la ampliación del puerto.
- Figura 4.3 Playa actual de Laxe y línea de bajamar en 1956.
- Figura 4.4 Planta actual de la playa de Laxe. Ajuste a espirales logarítmicas.
- Figura 4.5 Planta actual de la playa de Laxe. Ajuste de la línea de bajamar a parábolas de Hsu.
- Figura 4.6 Planta actual de la playa de Laxe. Ajuste de la línea de pleamar a parábolas de Hsu.
- Figura 4.7 Planta de playa prevista con un recorte de 40 m del dique exterior.
- Figura 4.8 Planta de playa prevista con un recorte de 70m del dique exterior.
- Figura 4.9 Línea límite para las actuaciones en el puerto, dentro de la cual no se altera el efecto del recorte de 70 m del dique exterior.
- Figura 4.10 Variación de la tasa de transporte en función de la altura de ola frente a la playa (N.M.=2,20 m). Situación actual y con recorte de 70.
- Figura 4.11 Tasa anual de transporte litoral calculada a partir del modelo bidimensional (valor negativo en sentido hacia el puerto).
- Figura 5.1 Configuraciones ensayadas: alternativas tipo A.



- Figura 5.2 Configuraciones ensayadas: alternativas tipo B. (La rampa se muestra en situación de pleamar).
- Figura 5.3 Configuraciones ensayadas: alternativas tipo C.
- Figura 6.1 Variación del nivel medio asociada a un tren de ondas.
- Figura 6.2 Modos de oscilación libre en ensenadas de formas geométricas simples (Wilson, 1966).
- Figura 6.3 Modos de oscilación de la dársena de Laxe. Situación actual. Comparación de resultados teóricos con resultados del modelo.
- Figura 6.4 Modos de oscilación de la dársena de Laxe. Situación actual con dos dársenas. Comparación de resultados teóricos con resultados del modelo.
- Figura 6.5 Ejemplos de modos de oscilación de la dársena de Laxe.
- Figura 6.6 Modos de oscilación de la dársena de Laxe. Comparación de los resultados de los distintos modelos.
- Figura 6.7 Secuencia del movimiento de un barco fondeado en Laxe durante el temporal del 10 de Marzo de 2008.
- Figura 6.8 Cálculo de la amplitud de la onda larga en Laxe. Temporal del 10 de Marzo de 2008.
- Figura 6.9 Resultados de la propagación de un espectro rosa. Alternativas A.
- Figura 6.10 Elevación de la lámina de agua. Resultados del modelo EMS.  $T=183$  s. Alternativas A.
- Figura 6.11 Resultados de la propagación de un espectro rosa. Alternativas B.
- Figura 6.12 Modos de oscilación de la dársena de Laxe. Alternativa B-1. Comparación de resultados teóricos con resultados del modelo.
- Figura 6.13 Resultados de la propagación de un espectro rosa. Alternativas B.
- Figura 6.14 Modos de oscilación de la dársena de Laxe. Alternativas C-2. Comparación de resultados teóricos con resultados del modelo.
- Figura 6.15 Modos de oscilación de la dársena de Laxe. Situación actual, A1 y C3. Comparación de resultados teóricos con resultados del modelo.
- Figura 6.16 Resultados de la propagación del espectro "rosa" en la situación de 1956. Comparación con la situación actual en marea alta y baja.



- 
- Figura 7.1 Resultados del modelo de agitación. Alternativas A.
  - Figura 7.2 Resultados del modelo de agitación. Alternativas C.
  - Figura 7.3 Análisis de operatividad. Zona 1.
  - Figura 7.4 Análisis de operatividad. Zona 2.



---

# **MEMORIA**

---



# Capítulo 1

## Objeto del estudio

El objeto del presente informe es el análisis de diversas alternativas para la remodelación del puerto de Laxe. Esta remodelación va encaminada a conseguir dos objetivos fundamentales:

- Mejorar las condiciones de agitación interior y de impacto de las ondas largas en el puerto actual.
- Reducir el impacto sobre la playa ocasionado por la última ampliación del dique de defensa, y permitir un retorno parcial de la unidad hacia su estado original de equilibrio.

### Estudios anteriores

Para el presente trabajo se han utilizado datos y conclusiones obtenidas en los siguientes estudios efectuados por HIDTMA en Laxe:

- “Estudio de Alternativas para la prolongación del contradique de Laxe” (Febrero de 2004).
- “Estudio da dinámica do litoral das obras pra remodelació do porto de Laxe” (Febrero de 2006).

### Estructura del informe

El presente informe se ha estructurado de la forma que se describe a continuación.

En el Capítulo 2 se presenta un resumen de los estudios efectuados y el sumario de las principales conclusiones obtenidas.

En el Capítulo 3 se describe el clima marítimo exterior que llega hasta la entrada de la ría de Laxe, el cual ha sido extraído de los estudios anteriores disponibles de la zona de Laxe, con su correspondiente actualización de datos.



En el Capítulo 4 se analiza el impacto de la última ampliación del dique de defensa sobre la playa de Laxe y las condiciones a establecer para aumentar su grado de estabilidad.

En el Capítulo 5 se describen las distintas alternativas de remodelación y ampliación estudiadas.

En el Capítulo 6 se analiza el efecto de las ondas largas sobre el puerto actual y sobre las posibles ampliaciones planteadas.

En el Capítulo 7 se estudia la agitación interior del puerto, tanto en la situación actual como en el caso de las distintas alternativas de ampliación.

En el Capítulo 8 se resume el presupuesto de ejecución aproximado de cada una de las alternativas.

La figura 1.1 presenta el plano de situación de la zona de estudio. La figura 1.2 representa la carta náutica en el entorno de Laxe. La figura 1.3 muestra la fotografía aérea de la ensenada de Laxe, con el puerto y la playa contigua. En la figura 1.4 se representa la batimetría actual en el entorno de la ensenada de Laxe.





## Capítulo 2

### Sumario y conclusiones

El objeto de la remodelación del puerto de Laxe es conseguir la definición de alternativas que conjuguen mejoras en las condiciones de resguardo del puerto frente al oleaje, con mejoras simultáneas en la estabilidad de la playa.

#### Problemas actuales del puerto

Los problemas detectados en relación con la operatividad del puerto de Laxe son los siguientes:

1. Se produce un fenómeno de ondas largas que llega a provocar el contacto de las embarcaciones con el fondo y rebases del mar por encima de los muelles, generando también corrientes muy intensas y remolinos en el interior de la dársena. En Marzo de 2008 se observaron ondas largas de amplitudes superiores a 2.50 m en el interior del puerto, con un periodo aproximado de 180 s.
2. En situaciones de temporal exterior los oleajes provocan una agitación elevada en el puerto. Una de las causas de esta entrada excesiva de energía es la reflexión de las olas en el contradique, lo que las hace penetrar hacia la zona interior de fondeo.
3. El basculamiento de la playa hacia el puerto provoca la entrada de sedimentos, afectando a los calados en la dársena. Este basculamiento fue agravado por la última ampliación del dique de defensa, y la playa no se encuentra por el momento en situación de equilibrio, prosiguiendo su deriva hacia el puerto. Se estima que la demolición de unos 70 m del dique exterior permitiría que la playa evolucionara hacia una situación más próxima a la que tenía antes de la ampliación, reduciendo sensiblemente la entrada de arena en la dársena portuaria.



## **Alternativas estudiadas**

Con el objeto de reducir la incidencia de las ondas largas en el puerto y mejorar sus condiciones de agitación interior, se han elaborado tres tipos diferentes de alternativas de remodelación de las obras de defensa:

- Alternativas A: Incluyen el recorte del dique de abrigo en 70 m, la demolición del muelle comercial y la construcción de un martillo interior de protección. También incluye la demolición completa del contradique y el traslado de la rampa de varada hacia el muelle de ribera.
- Alternativas B: consisten en la demolición de la primera alineación del dique actual, lo que serviría como entrada a una nueva dársena situada al Norte de la actual y protegida por un nuevo dique de defensa. Se incluye la demolición de los últimos 70 m del dique actual y del contradique, así como el traslado de la rampa de varada hacia el muelle de ribera.
- Alternativas C: Se trata de configuraciones basadas en un nuevo puerto exterior, con dos alternativas en las que se demuele por completo el dique exterior actual, y otra en la que se construye una nueva dársena independiente al Norte de la actual.

## **Respuesta de las alternativas a las ondas largas**

El fenómeno de ondas largas en Laxe responde a la geometría de la ensenada, con los nodos de resonancia principales situados en el exterior del puerto. Por ello, sus efectos en el interior del puerto son difíciles de contrarrestar mediante simples reformas de la configuración de la instalación.

Ninguna de las alternativas ensayadas resulta plenamente adecuada para la eliminación del problema de la onda larga, siendo en este sentido la más favorable la Alternativa C-3, en la que la nueva dársena se encuentra fuera de la zona de resonancia de la ensenada.

Las Alternativas del tipo A permiten reducir levemente el efecto de las ondas largas, tanto en lo que respecta al coeficiente de amplificación como a las velocidades máximas generadas en la dársena portuaria. A este respecto se ha constatado que la construcción del actual dique de defensa fue la causa del inicio de estos problemas en el puerto, por lo que toda alternativa que elimine parcialmente dicho dique será favorable para la reducción de la resonancia.



Las Alternativas del tipo B son totalmente desaconsejables para la ampliación del puerto, al aumentar significativamente el efecto de la resonancia. Las Alternativas C-1 y C-2, similares en su configuración a las Alternativas B, tampoco son adecuadas para resolver este problema.

### **Respuesta de las alternativas a la agitación interior**

Los problemas de agitación actuales del puerto derivan en gran medida de las reflexiones del oleaje en el contradique. Por eso, tanto las Alternativas A como las Alternativas C permiten reducir la agitación interior en la dársena, al eliminar esta obra y aumentar la longitud de playa en las cercanías del puerto, que actúa como frente de amortiguación del oleaje. De esta forma, la altura de ola máxima actual que se produce en el interior del puerto, y que es de 1.0 m aproximadamente, se reduce a valores de 40-60 cm con las Alternativas A y C ensayadas.

### **Presupuesto**

Los costes estimados de cada una de las alternativas incluyen las siguientes partidas:

- Demolición del dique actual y del muelle comercial.
- Demolición del contradique y traslado de la rampa de varada.
- Nuevos diques de defensa y martillos interiores.
- Nuevos muelles interiores (Alternativas B y C).

El presupuesto estimado para las Alternativas A es de unos 10-12 Mm €.

Para las Alternativas B el coste de construcción es de unos 30 Mm €.

Las Alternativas C tienen costes de construcción de unos 33-40 Mm €.

### **Recomendaciones**

El problema de ondas largas en el puerto actual de Laxe es muy difícil de solucionar, sobre todo si se tiene en cuenta el desconocimiento existente sobre el rango real de periodos que inciden en la ensenada. Por ello, se propone avanzar en la remodelación del puerto mediante tres fases sucesivas:

- Fase I: Establecimiento de una campaña de seguimiento y medida de las ondas largas en Laxe, como base para la definición de las futuras mejoras y ampliaciones de las instalaciones portuarias.



- Fase II: Proyecto de una alternativa tipo A de las analizadas, incluyendo las siguientes actuaciones:
  - Eliminación de al menos 70 m del dique exterior, facilitando la estabilidad de la playa y contribuyendo a atenuar los efectos de las ondas largas.
  - Eliminación del contradique y traslado de la rampa de varada.
  - Dragado del puerto para reducir el riesgo de las embarcaciones frente a las ondas largas.
  - Construcción de un martillo para reducir la agitación interior.
- Fase III: Análisis de viabilidad técnica y económica de una nueva dársena exterior (Alternativa C-3), aislada de los problemas de resonancia y con condiciones de agitación adecuadas. Será necesario garantizar que las condiciones de entrada a la nueva dársena serán adecuadas, tanto en lo que respecta a la zona de maniobra como a la ausencia de rotura del oleaje en su entorno durante los máximos temporales.

Todas las actuaciones incluidas en la Fase II mejoran los problemas de ondas largas, agitación y sedimentación en el puerto, y son plenamente compatibles con las actuaciones de la Fase III, por lo que las inversiones a realizar en la mejora del puerto serán permanentes.



# ÍNDICE

## MEMORIA

1	Introducción .....	1
1.1	Antecedentes y objeto del estudio.....	1
1.2	Contenido del informe .....	1
2	Sumario ejecutivo .....	2
3	Descripción del problema .....	3
3.1	Incidencia de los temporales exteriores en la ría .....	3
3.2	Modelización de ondas largas en el puerto .....	3
4	Medición de ondas largas.....	6
4.1	Introducción .....	6
4.2	Campaña de medidas .....	6
4.3	Altura de onda larga generada .....	9
4.4	Espectro de resonancia .....	10
4.5	Modo de oscilación.....	12
4.4	Corrientes generadas por la onda larga .....	14
4.5	Conclusiones .....	16
5	Agitación interior .....	17
5.1	Introducción .....	17
5.2	Resultados del modelo .....	17
5.3	Comparación con las medidas .....	18

## ANEJOS

Anejo 1	Resultados del análisis espectral
---------	-----------------------------------



# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1 Antecedentes y objeto del estudio

Portos de Galicia ha realizado una campaña de medidas instrumentales en el Puerto de Laxe, con el fin de caracterizar las ondas cortas y largas que afectan al puerto y a la ensenada. La decisión de monitorizar el puerto con la instrumentación necesaria para caracterizar la energía que incide sobre él fue tomada tras el análisis de las conclusiones de una serie de estudios técnicos que vienen desarrollándose desde el año 2004.

- Estudio de dinámica litoral y agitación en el Puerto de Laxe (2004-2005 )
- Estudio de impacto en la costa de las obras de remodelación del puerto de Laxe (2005)
- Estudio de alternativas de remodelación del puerto de Laxe (2008)
- Estudio de agitación y resonancia de la nueva plataforma del Puerto de Laxe (2011)

Mediante las medidas instrumentales y el análisis de las mismas, se pretende además validar los modelos matemáticos utilizados en los estudios anteriormente mencionados.

El objeto de este informe es, por tanto, proceder a la explotación de toda la información recogida mediante las distintas boyas y sensores instalados en la zona. En concreto se pretende:

- Analizar los datos de agitación y resonancia obtenidos mediante registros instrumentales.
- Contrastar éstos con los resultados obtenidos en estudios anteriores realizados mediante modelos matemáticos.

### 1.2 Contenido del informe

El presente documento se ha estructurado en cinco secciones diferenciadas:

- En el Capítulo 1 se señalan los antecedentes y los objetivos del Estudio.
- En el Capítulo 2 se incluye el sumario ejecutivo del trabajo.
- En el Capítulo 3 se recoge una descripción del problema que afecta al puerto y ensenada de Laxe.
- El Capítulo 4 se centra en el análisis de los datos de ondas largas.
- En el Capítulo 5 se analizan los datos y resultados de agitación.



# Capítulo 2

## Sumario ejecutivo

Los pasos seguidos para el análisis de la campaña de medidas llevada a cabo en el Puerto de Laxe han sido los que se describen a continuación.

- Se ha realizado un resumen de la caracterización del oleaje exterior, a partir de los datos de la boya de Villano Sisargas. El estudio del clima marítimo incluye un análisis direccional y la propagación de los temporales exteriores hasta la entrada de la ensenada de Laxe.
- Se ha realizado asimismo un resumen de los análisis de onda larga realizados por medio de modelizaciones numéricas.
- Se han analizado los datos de los sensores obtenidos en la campaña de medidas, haciendo un barrido de los mismos y seleccionando los registros con mayores alturas de ola, de los cuales se realiza el análisis espectral.
- Se han comparado los datos registrados en el sensor instalado en el interior del puerto, con los datos registrados en la boya exterior de Villano Sisargas y se han elaborado gráficos de concordancia entre los parámetros medidos.
- Tomando como base los datos de los dos puntos anteriores, se ha realizado un análisis espectral de los datos de la campaña.
- Se han comparado los datos instrumentales con los datos de los modelos, tanto en lo que se refiere a altura de onda larga generada, como a la intensidad y dirección de las corrientes que definen los modos de oscilación de la ensenada
- También se han comparado los niveles de agitación por onda corta registrados en el puerto con los previstos mediante modelo matemático.

Los resultados del análisis comparativo pueden resumirse en las siguientes conclusiones:

- La campaña de medidas realizada durante los años 2009 y 2010 confirma los análisis previos realizados por medio de modelos matemáticos y reflejados en los informes técnicos desarrollados para Portos de Galicia.
- En la ensenada de Laxe se registra la resonancia de una onda larga de periodo básico  $T = 210$  s
- Como resultado de esta oscilación, en la dársena portuaria se generan ondas que pueden llegar a alcanzar alturas superiores a los 2 m
- La onda larga se genera en toda la ensenada de la ría, produciendo oscilaciones del conjunto, de forma que su eliminación no es posible mediante obras que se limiten a la zona portuaria.
- Los coeficientes de agitación calculados mediante modelo matemático son bastante similares a los registrados durante la campaña de medida.

# Capítulo 3

## Descripción del problema

### 3.1 Incidencia de los temporales exteriores en la ría

En los estudios realizados por Hidtma, se tomaron como base para el análisis de oleaje exterior los datos de la boya de Villano Sisargas (Puertos del Estado), debido a su ubicación cercana y al amplio periodo de medidas registradas (1998-actualidad).

Los oleajes incluidos en el régimen direccional de la boya se propagan mediante modelos matemáticos hasta la entrada de la ría de Laxe, según se muestra en la figura 3.1 en la que se recogen las representaciones polares de los oleajes exteriores y propagados.

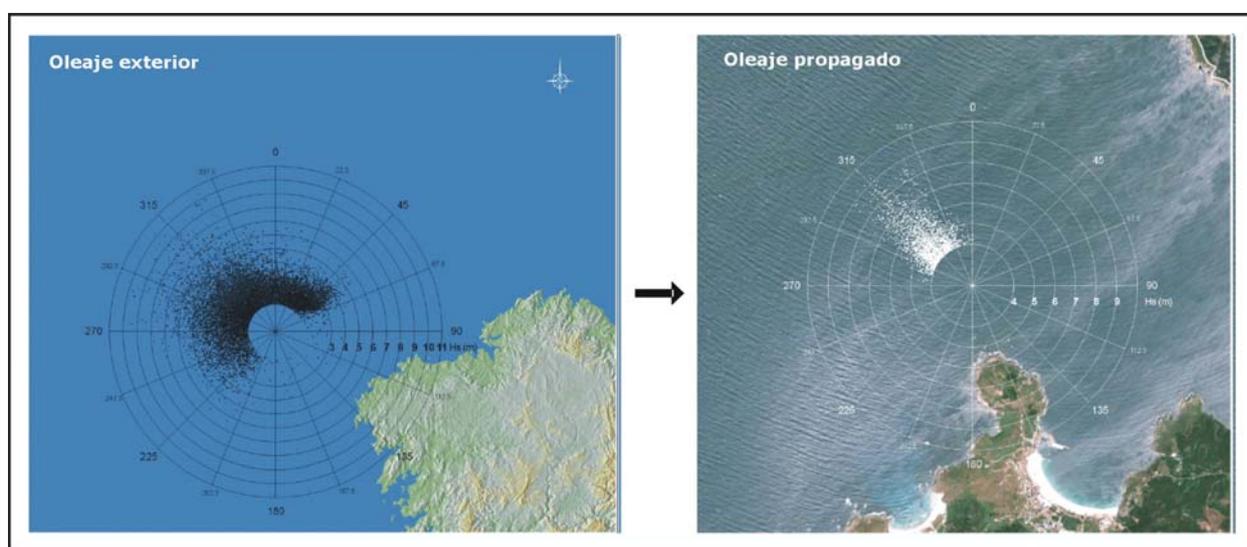


Figura 3.1 – Oleajes exteriores y propagados hasta la ría de Laxe.

Según puede observarse, los mayores temporales que llegan a la entrada de la ría provienen del sector direccional comprendido entre 315-320 grados, por lo que es la dirección 320 (oleajes predominantes del NW) la seleccionada para las simulaciones de onda larga y de propagación desde la entrada de la ría hasta el puerto para el correspondiente análisis de agitación.

### 3.2 Modelización de ondas largas en el puerto

#### Introducción

La clasificación de las ondas generadas en el medio marino, y por extensión en cualquier cuerpo de agua, se realiza tomando como base criterios de frecuencia o criterios hidrodinámicos. Así, y atendiendo a la frecuencia, la llamada onda corta u onda gravitatoria tiene usualmente periodos inferiores a 25 s, mientras que la onda larga o de infragravedad alcanza periodos de hasta varios minutos.

En términos hidrodinámicos, las ondas se definen como cortas o largas en función de la relación existente entre su longitud y la profundidad del medio, siendo las ondas cortas aquellas en las que la

relación entre la profundidad ( $h$ ) y la longitud de onda ( $L$ ) es  $h/L > 1/2$ , mientras que en las ondas largas  $h/L < 1/20$ .

Por su modo de propagación, las ondas largas pueden ser de tres tipos:

- Ondas largas forzadas, cuyo modo de propagación va unido al del fenómeno que la ha generado.
- Ondas largas libres, cuyo modo de propagación es ya independiente del fenómeno que la ha causado.
- Ondas largas estacionarias, que permanecen confinadas en un determinado cuerpo de agua.

En lo que respecta a los fenómenos de oscilación de dársenas portuarias o ensenadas, las ondas largas que los provocan suelen estar generados por dos tipos de agentes:

- Las ondas largas asociadas al oleaje exterior, y generadas por la interacción no lineal entre frecuencias próximas.
- Las oscilaciones de los grandes cuerpos de agua causadas por perturbaciones meteorológicas.

Cuando un oleaje exterior lleva asociada una onda larga forzada, se trata de una oscilación que apenas es detectable en aguas profundas (ver figura 3.2).

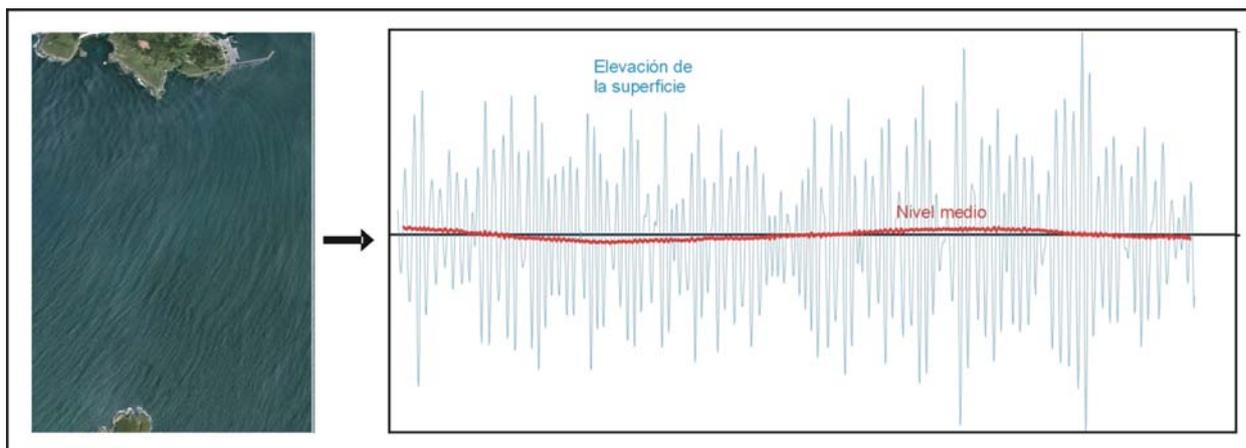


Figura 3.2 – Oscilación de onda larga en aguas profundas .

Sin embargo, dicha onda puede liberarse como consecuencia de procesos intensos de difracción o por rotura del oleaje primario, dando así lugar a una onda libre que se propaga por el medio siguiendo sus propias leyes hidrodinámicas. Esta onda larga liberada puede provocar fenómenos de oscilación en dársenas portuarias, ya que se amplifica mucho cuando llega a profundidades reducidas.

La propagación de un oleaje se realiza mediante grupos de olas, a cuyo paso el nivel medio del mar sufre oscilaciones derivadas de las variaciones del tensor de radiación ( $S$ ). El gradiente del momento asociado al oleaje se compensa con el gradiente de presión hidrostática provocado por la pendiente del nivel medio del mar. De esta forma, en los grupos de olas altos se produce un descenso del nivel medio (*set-down*), mientras que al paso de las alturas de ola más reducidas se produce una elevación de ese nivel (*set-up*). Dado que el gradiente del tensor de radiación es casi nulo en profundidades indefinidas, el fenómeno sólo va adquiriendo relevancia cuando el oleaje se aproxima a profundidades reducidas, y alcanza su máximo valor cuando se produce la rotura del oleaje.

Este proceso afecta no sólo a los puertos, sino también a las playas. Cuando una onda larga se libera en una playa, ésta puede reflejarse y quedar atrapada en la línea de orilla por la refracción sobre el fondo, dando lugar a las llamadas ondas de orilla o *edge waves*, las cuales presentan un antinodo en la orilla, con su amplitud decayendo de forma exponencial hacia aguas profundas. La presencia de ondas largas en una playa es mayor cuando ésta presenta un perfil disipativo (pendiente suave, con rotura de tipo *spilling*), mientras que es más reducida en playas reflectivas (pendiente elevada, con rotura del tipo *plunging* o *surging*). En la figura 3.3 se presenta un ejemplo de ondas de orilla en la playa de Laxe.

En la figura 3.4 se muestra un esquema gráfico del proceso de aproximación, liberación y resonancia de ondas largas en la ensenada de Laxe. El tren de olas que llega a la ensenada libera la onda larga asociada, ya sea debido al proceso de rotura del oleaje o al proceso de difracción. Esa onda liberada se propaga hacia el interior de la ensenada, generando fenómenos de resonancia que la amplifican, siendo las características de este fenómeno diferentes en función del periodo de la onda larga y de la geometría concreta de la ensenada.



Figura 3.3 – Generación de ondas de orilla.

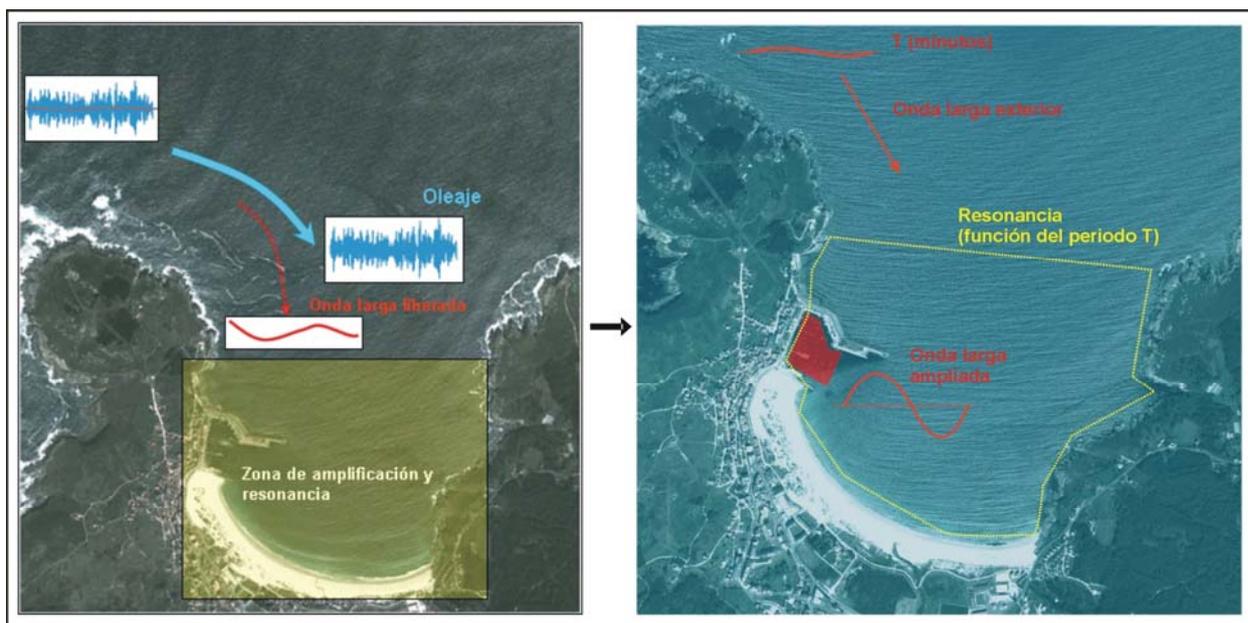


Figura 3.4 – Liberación de la onda larga asociada a un tren de olas.

## Metodoloxía

El análisis de las ondas largas puede ser realizado mediante diversos modelos. En los estudios realizados por Hidtima S.L. se ha analizado el fenómeno de la resonancia por medio de la utilización de tres modelos diferentes:

- **Propagación de un espectro rectangular (Modelo BW)** - Se introduce un espectro de oleaje que contenga todas las frecuencias desde 40 s hasta 400 s de periodo, con su energía repartida por igual entre todas ellas (espectro rectangular de ruido “rosa”). Se propaga el oleaje mediante el modelo de refracción-difracción y se obtiene el espectro resultante en los puntos seleccionados. La comparación entre el espectro de entrada y el registrado en cada punto permite calcular el factor de amplificación de la energía del oleaje.
- **Análisis por periodos (Modelo EMS)** - Se propaga una onda regular de una altura de ola determinada, y se obtiene la altura de ola en el puerto. Este proceso se repite para ondas de 40, 50, 60 .... 400 s. La comparación entre la altura de ola a la entrada del modelo y la registrada en el puerto permite calcular el factor de amplificación de la altura de ola para un periodo concreto.
- **Propagación de una onda senoidal (Modelo HD)** – Se propaga una onda senoidal de periodo coincidente con alguno de los picos de resonancia obtenidos en el espectro de la simulación con el modelo BW. Este proceso se repite para los diferentes periodos de interés. Los resultados permiten analizar las elevaciones de la lámina de agua y las velocidades de corriente producidas por el fenómeno de la resonancia.

El primero de los modelos fue empleado para determinar la respuesta del puerto actual y de sus posibles alternativas de ampliación a una extensa gama de periodos de resonancia. El segundo modelo se utilizó para analizar las variaciones de la corriente generada en las dársenas por las ondas largas de periodos singulares. Y el tercero para analizar las elevaciones de la lámina de agua y comprobar los modos de oscilación y la ubicación de los nodos existentes en la ensenada de Laxe.

En la figura 3.5 se muestra un ejemplo de los resultados obtenidos en las simulaciones con el modelo Mike 21 EMS y se indican los dos modos de oscilación principales resultantes para los periodos de pico analizados.

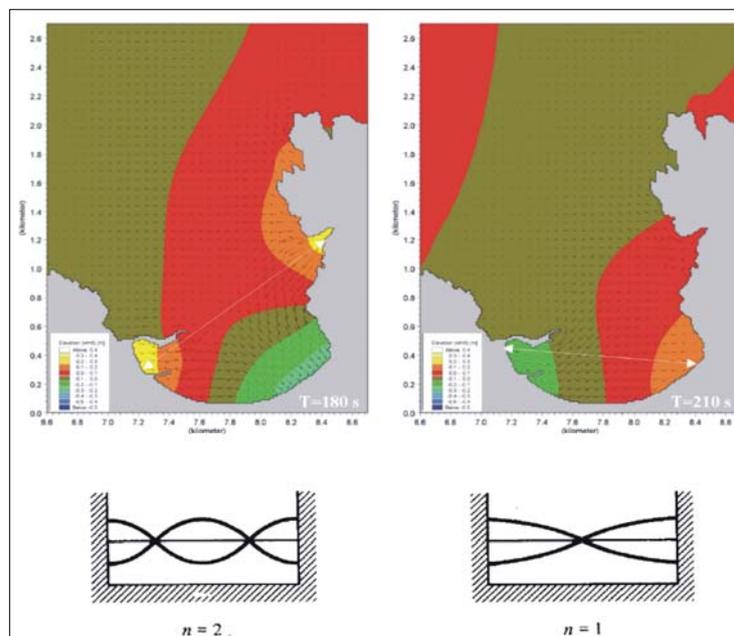


Figura 3.5 – Resultados de las simulaciones con el modelo Mike 21 EMS.

En la figura 3.6 se recoge un ejemplo de los resultados obtenidos con el modelo Mike 21 BW, en el que se muestran los periodos de resonancia de la dársena y sus amplificaciones.

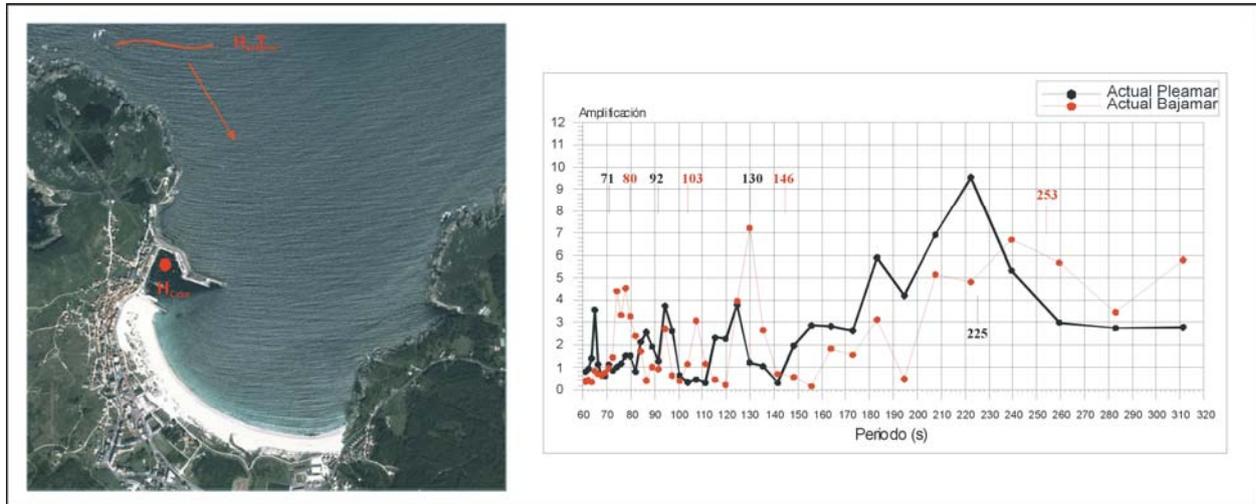


Figura 3.6 – Resultados de las simulaciones con el modelo Mike 21 BW.

#### Efectos de las ondas largas en Laxe

Uno de los mayores temporales registrados en la boya de Villano Sisargas, se produjo el 10 de marzo de 2008. Partiendo de una filmación de video realizada en el puerto de Laxe durante ese temporal, se midió el periodo de las oscilaciones que se produjeron en el interior del puerto. En la figura 3.7 se recoge la secuencia de la filmación, que muestra la oscilación de un barco fondeado en la dársena, en las proximidades de la esquina interior del muelle comercial. En esta secuencia se observa que la oscilación de la embarcación muestra un periodo en el entorno de los 180 s, precisamente en el rango donde los modelos matemáticos indican amplificaciones de la onda muy significativas.

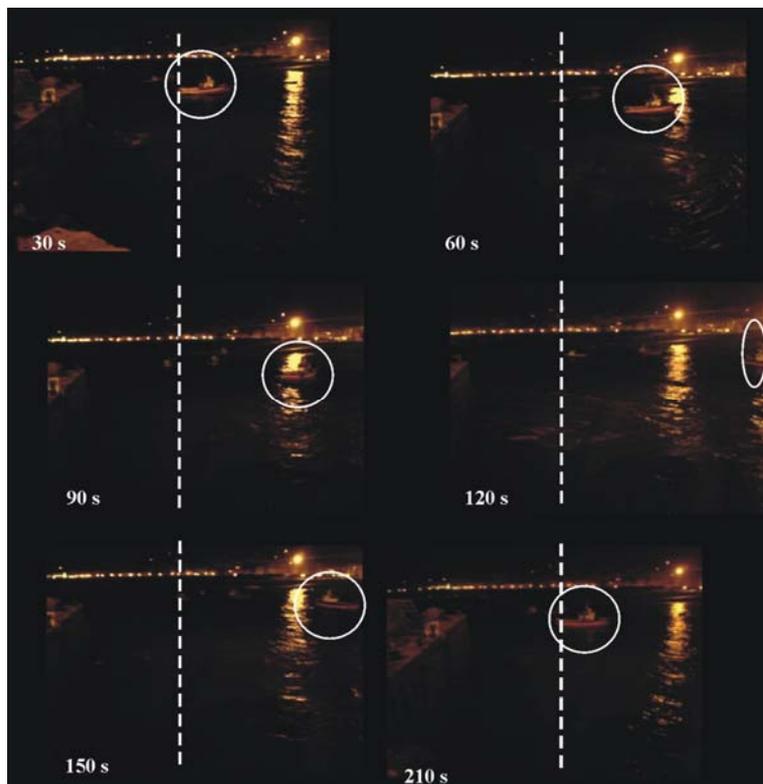


Figura 3.7 – Resultados de las simulaciones con el modelo Mike 21 BW.

# Capítulo 4

## Medición de ondas largas

### 4.1 Introducción

En el presente capítulo se describen y analizan los datos de la campaña de medidas instrumentales en la ensenada de Laxe. Estas medidas incluyen el registro de elevaciones y corrientes en distintos puntos de la ensenada y el puerto, proporcionando información sobre la agitación debida a los oleajes y las características resonantes del mismo.

Por medio del análisis de estas medidas se realiza la validación de los modelos matemáticos utilizados en los estudios desarrollados previamente.

### 4.2 Campaña de medidas

En la figura 4.1 se muestra la ubicación de los equipos de medida instalados en las campañas llevadas a cabo en el puerto de Laxe en los años 2009 y 2010.



Figura 4.1 – Puntos de ubicación de los equipos de medida.

Los equipos instalados en los puntos P-1 y P-4 son sensores que registran la presión absoluta para obtener datos sobre la variación del nivel medio del mar, permitiendo así el registro escalar del oleaje. Aportan series de registros de elevaciones de 2048 s de duración, calculadas a partir de los datos de presión y densidad.

En el punto P3 se ubica un radar que mide de forma continua la posición de la superficie libre, con una precisión milimétrica en todo el espectro de frecuencias. Este sensor mide la distancia,  $x$ , desde el punto de medida hasta una superficie reflectante mediante una señal radar. Las elevaciones

respecto al cero del puerto se obtienen de restar a la cota del punto de medida,  $c = 9.256\text{m}$ , la distancia  $x$  como muestra la figura 4.2. Proporciona series de registros de elevaciones que permiten analizar la marea, la onda larga y el oleaje escalar.

Los equipos instalados en P-2 y P-5 son correntímetros Doppler que permiten estimar el espectro direccional (incidente y reflejado) del oleaje y onda larga. Proporcionan series de registros de las tres componentes de velocidad (U, V, W).

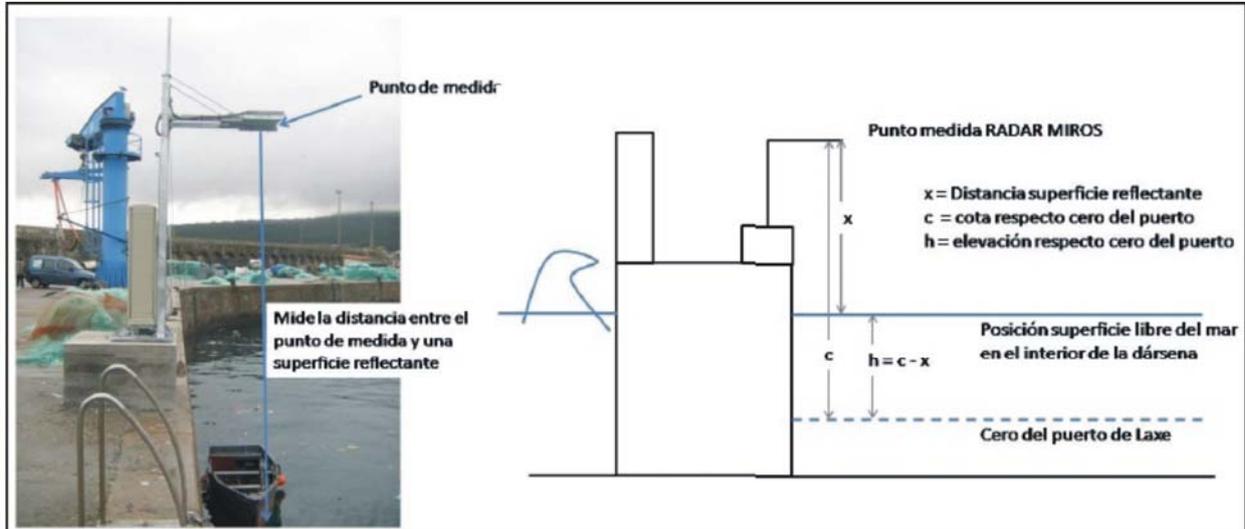


Figura 4.2 – Esquema de funcionamiento del radar.

### 4.3 Altura de onda larga generada

Para realizar el análisis de los registros disponibles se hace un barrido inicial de los datos del sensor y de los de la boya exterior de Villano Sisargas. Esta comparación permite identificar los eventos de mayor altura de ola en la boya exterior, y los eventos de mayor oscilación lde nivel medio en el interior del puerto. Previamente, a los datos registrados en el interior se les resta la onda de marea, de forma que el resultado es la perturbación debida sólo al oleaje de temporal.

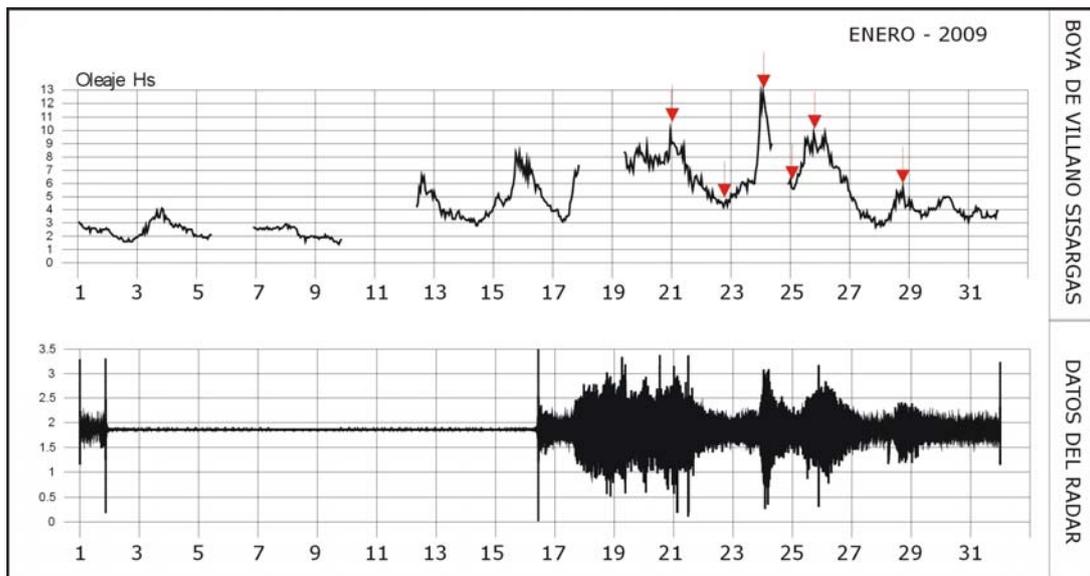


Figura 4.3 – Comparación de los datos del radar y la boya de Villano Sisargas.

En la figura 4.3 puede observarse la clara relación existente entre la altura significativa de los temporales registrados en la boya y las oscilaciones registradas en el radar ubicado en el interior del puerto.

Para cada uno de los temporales seleccionados, se obtiene el espectro de onda larga de la señal del radar y se calcula la  $H_s$  de onda larga generada. Tomando como base los datos de los coeficientes de propagación desde el exterior hasta la entrada de la ría obtenidos en los modelos numéricos, se obtiene la altura significativa a la entrada de la ría de cada uno de los temporales seleccionados en la boya de Villano Sisargas. De este modo puede establecerse la relación entre la altura de ola de temporal a la entrada de la ría y la altura de ola de onda larga generada en el interior del puerto, como se muestra en la figura 4.4. En esta gráfica se observa la relación directa que hay entre la altura de temporal y la altura de onda larga generada en el interior del puerto, siendo esta relación la siguiente:

$$H_{\text{onda larga}} = 0.20 \times H_{s,\text{entrada ría}} - 0.45$$

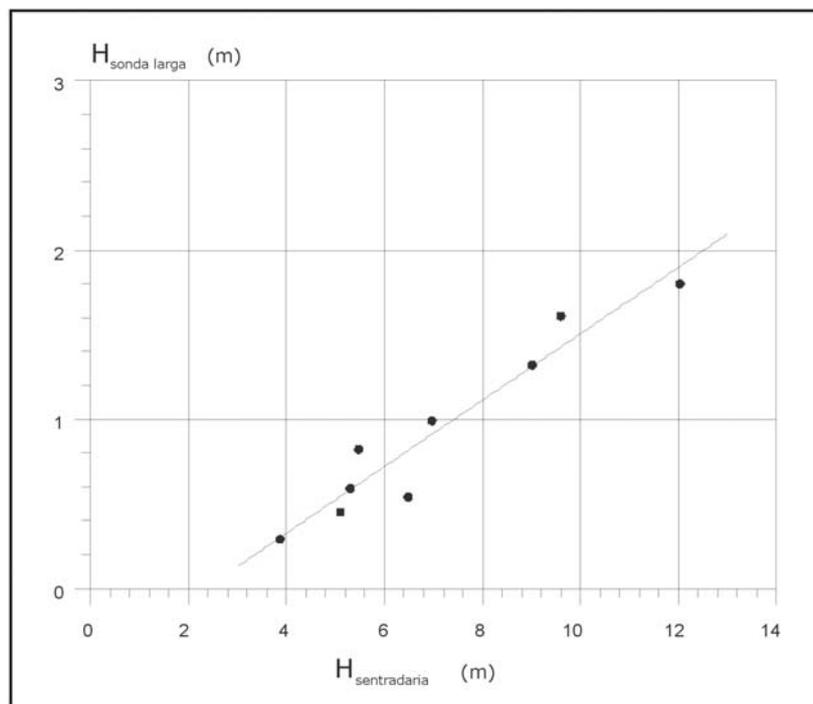


Figura 4.4 – Relación entre la altura de temporal ( $H_s$ ) a la entrada de la ría y la altura de onda larga generada en el interior del puerto.

#### 4.4 Espectro de resonancia

Tal como se ha mencionado anteriormente, para cada uno de los temporales más relevantes observados en la boya se seleccionan los registros correspondientes en el radar y se obtiene el espectro de onda larga. El análisis de ese espectro permite detectar cuáles son los periodos de resonancia que se producen en el interior de la dársena como consecuencia de los oleajes que llegan al puerto desde el exterior.

En la figura 4.5 se recoge un ejemplo de la serie de elevaciones registrada en el radar durante uno de los temporales del mes de enero de 2009, y el correspondiente espectro de onda larga obtenido. Puede observarse que los periodos de resonancia que muestran una mayor densidad espectral se encuentran en la franja de los 210-220 s.

En la figura 4.6 se resume el resultado de algunos de los espectros correspondientes a los diferentes temporales seleccionados en el mes de enero, observándose que los periodos resonantes se encuentran siempre centrados en los mismos valores (200-220 s), mostrando una mayor dispersión cuando la energía del temporal es menor.

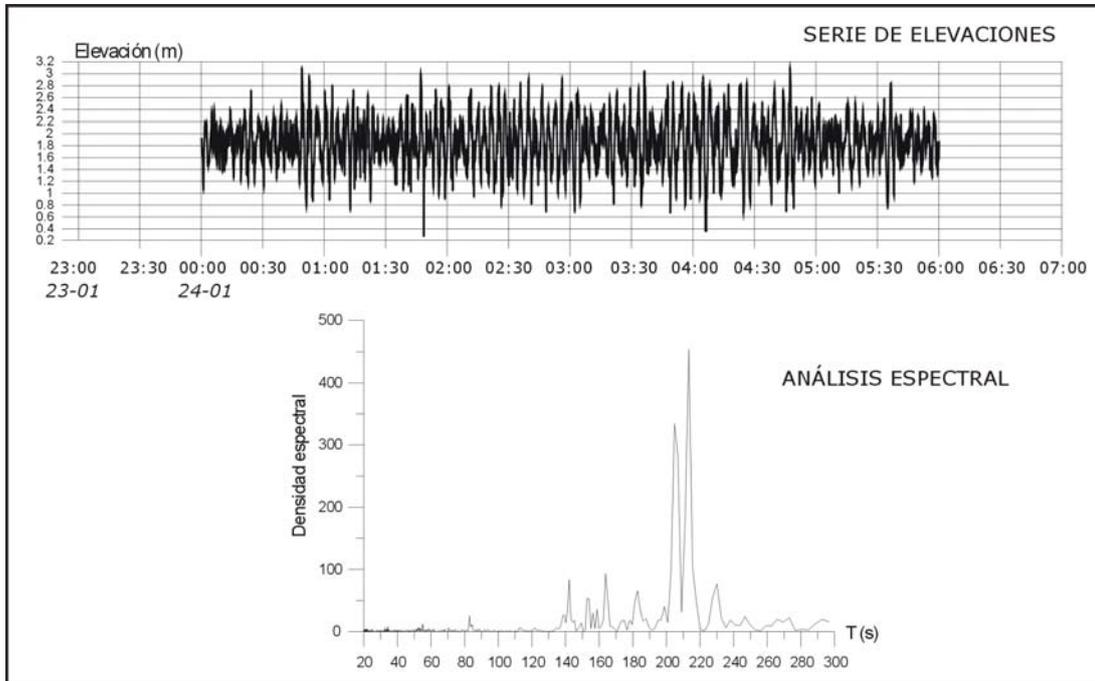


Figura 4.5 – Análisis espectral de onda larga en el interior del puerto.

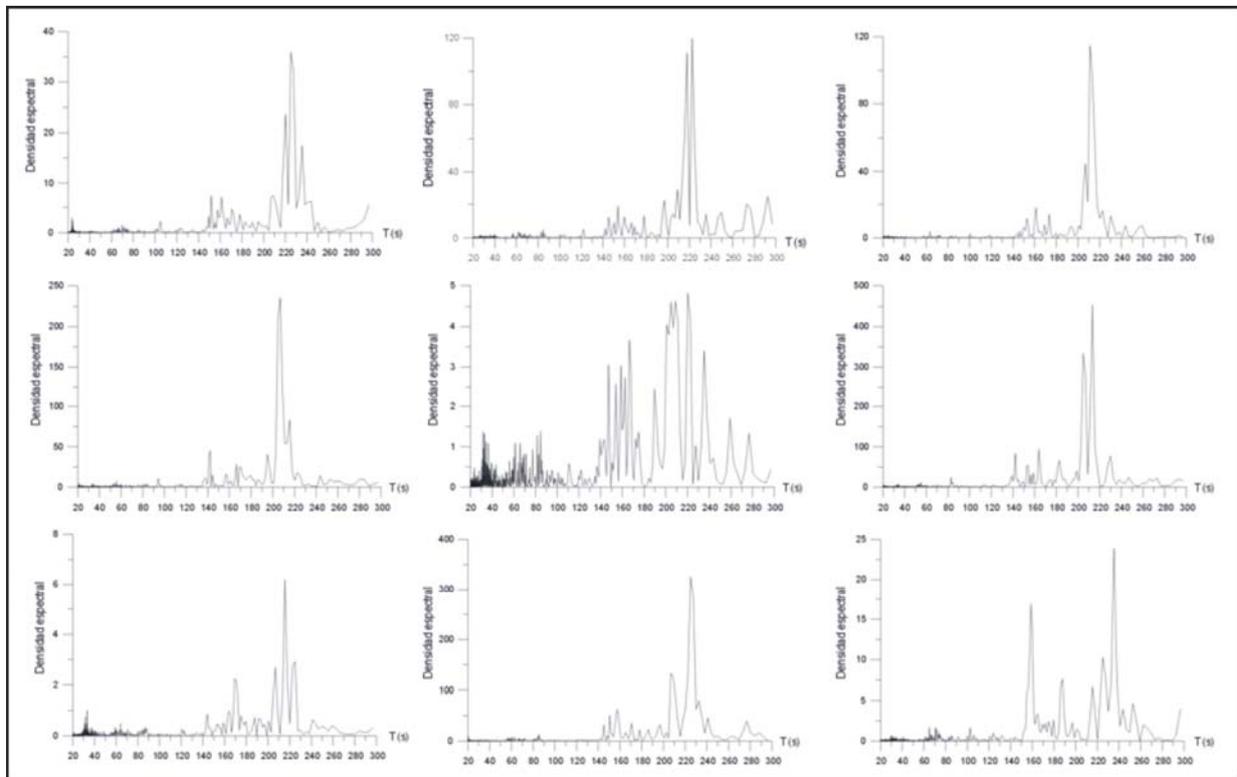


Figura 4.6 – Análisis espectral de onda larga en el interior del puerto.

En el Anejo 1 – *Resultados del análisis espectral* se recogen todos los gráficos correspondientes a los temporales seleccionados durante toda la campaña de medidas.

Con el fin de comparar los resultados de los registros de los equipos de medida instalados en el puerto de Laxe con los correspondientes a los obtenidos en las modelizaciones numéricas, se representan los espectros de ambas fuentes (instrumentación y modelo) en una misma gráfica, para estados de marea coincidentes. En la figura 4.7 puede observarse la buena correlación existente entre ambos espectros, tanto en situación de bajamar como de pleamar, mostrando un patrón muy semejante de picos resonantes. Es necesario aclarar que, en el caso del modelo matemático, la figura representa la amplificación de cada una de las posibles frecuencias de onda larga incidente, mientras que en el caso del registro se representa la energía del espectro real producido en la ensenada.

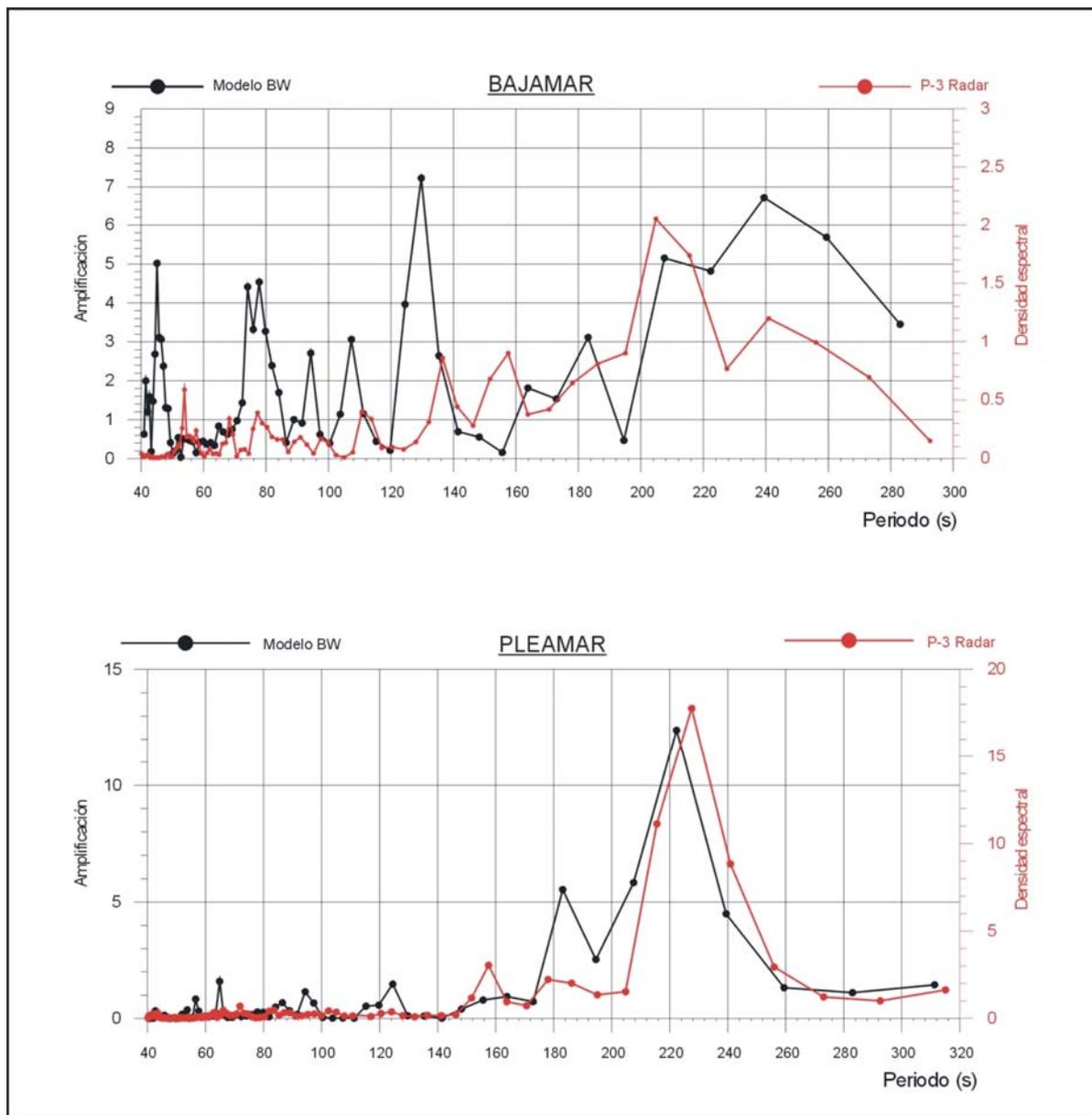


Figura 4.7 – Coeficiente de amplificación de la onda larga en modelo y espectro de oscilación registrado en el interior del puerto.

## 4.5 Modo de oscilación

Cualquier ensenada natural o artificial, ya sea cerrada o abierta, tiene modos de oscilación que pueden ser excitados por fenómenos tales como terremotos, oleajes de largo periodo o perturbaciones meteorológicas. Para una dársena teórica rectangular de calado constante, la relación entre su anchura ( $l$ ) y la longitud de la onda resonante es:

$$L = \frac{2l}{n}$$

Siendo ( $n$ ) el número de nodos que se producen (ver figura 4.12). Dado que en aguas someras se cumple la relación de dispersión:

$$C = \frac{L}{T} = \sqrt{gh}$$

Siendo ( $h$ ) la profundidad, se deduce la llamada fórmula de Merian,

$$T = \frac{2l}{n\sqrt{gh}}$$

Para el caso de otras formas de dársena diferentes, pueden establecerse otras formulaciones similares a la anterior, en la que el periodo se ve modificado por un coeficiente ( $k$ ) de valores diversos en función de la geometría de la planta y el perfil de la ensenada.

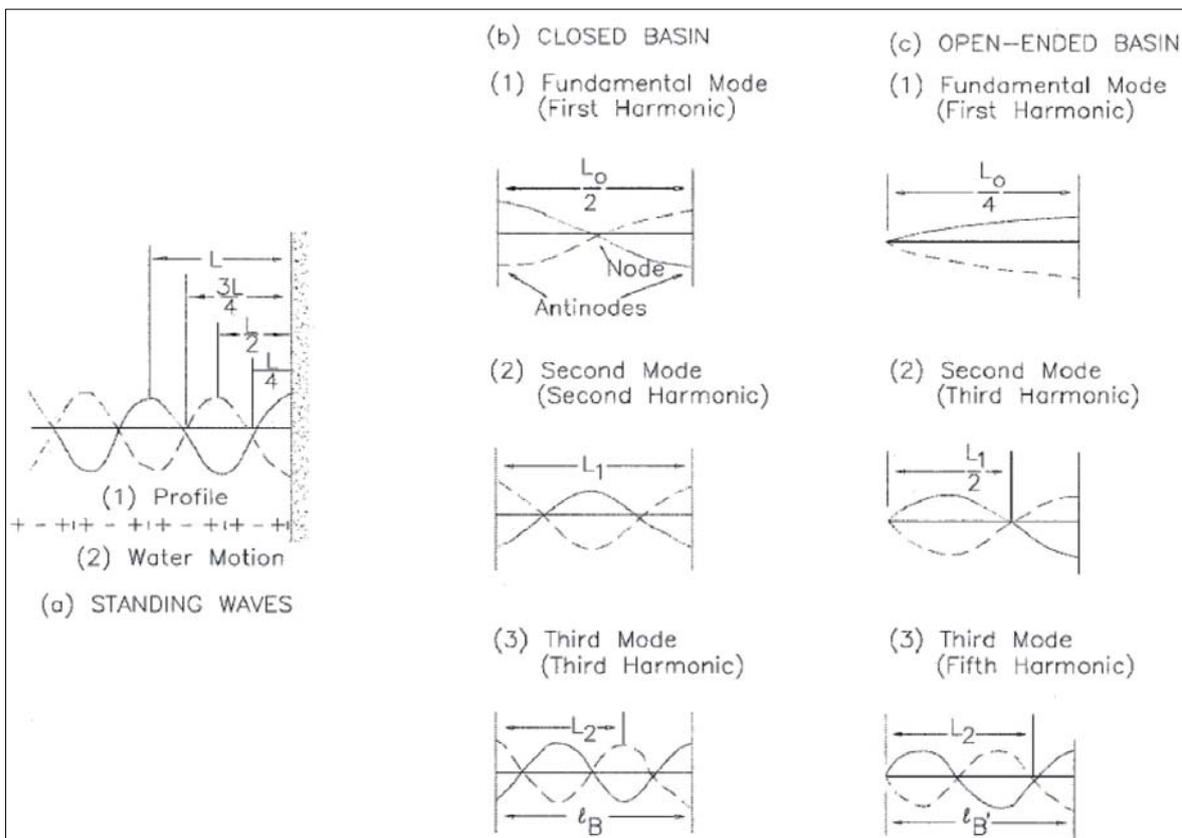


Figura 4.8 – Diversos modos de oscilación de la superficie libre de una dársena.

En la figura 4.9 se muestra la serie temporal de elevaciones de los equipos de medida ubicados en los puntos P-3 (radar) y P-4 (sensor de presión). La superposición de ambas series temporales muestra un desfase constante de 180 grados entre ambas, observándose que cuando un extremo de la ensenada se encuentra en su nivel mínimo, en el otro punto de medida se alcanza el valor máximo de elevación, lo que indica una oscilación del tipo ( $n=1$ ) de la masa de agua de la ensenada, con un periodo aproximado 210 s, que es la distancia temporal entre picos del registro. Los resultados del modelo en términos de elevaciones de la lámina de agua muestran exactamente ese mismo modo de oscilación para el periodo de 210s, tal como puede comprobarse en el gráfico de la misma figura.

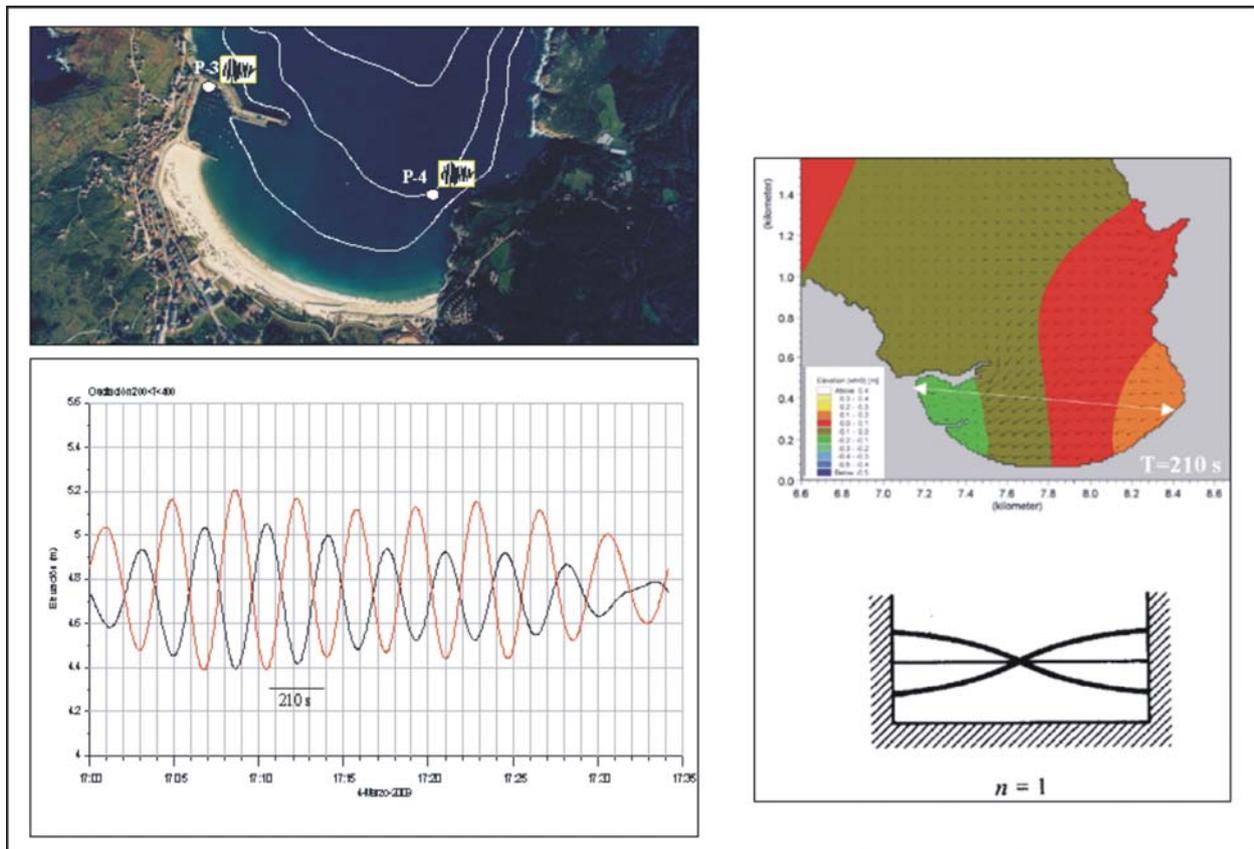


Figura 4.9 – Modo de oscilación de la ensenada de Laxe: resultado del modelo (derecha) y registro de elevaciones en los puntos de medida P-3 y P-4 (izquierda).

#### 4.6 Corrientes generadas por la onda larga

Tal como se ha indicado anteriormente, los equipos de medida instalados en los puntos P-2 y P-5 proporcionan series temporales de las componentes de la velocidad de la corriente. En la figura 4.10 se muestra un detalle del análisis de los registros, en la que se observa la correlación existente entre los temporales en el exterior y el aumento de la velocidad en los sensores (componentes U y V).

Por su parte, en la figura 4.11 se recogen diferentes instantes de la simulación realizada con el módulo Mike 21 HD para una onda senoidal de 210 s de periodo, que se propaga hacia el interior de la ensenada. Los diferentes gráficos muestran la evolución temporal de las elevaciones de la lámina de agua, junto con los vectores de velocidad de la corriente. Esto permite definir con precisión los modos de oscilación del nivel medio de la ensenada así como la intensidad y dirección de las corrientes generadas.