

5.- Resultados experimentales hidromorfodinámicos en la zona costera del Delta del Ebro

5.1.- Descripción de la campaña Delta'96

A continuación se presentan los experimentos hidromorfodinámicos de gran escala Delta'96 y sus primeros resultados. Esta campaña fue llevada a cabo por el LIM-UPC y diversas instituciones Españolas y Rusas, dentro del marco de los proyectos internacionales CIIRC y FANS (Flow Across Narrow Shelves "The Ebro Delta Case") de la UE. El objetivo fue estudiar integralmente procesos meteorológicos e hidromorfodinámicos, su inter-relación y su impacto dinámico en la zona cercana a la costa (NS). Durante los experimentos se presentaron diversas condiciones ambientales que afectaron a toda el área en estudio, además de diversas estructuras complejas de circulación, con superposición de viento y oleaje como mecanismos impulsores.

La campaña Delta'96 introdujo innovaciones importantes con respecto a los experimentos previos Delta'93 (ver Rodríguez *et al.*, 1994 y 1995a) y tuvo como objetivos fundamentales el estudio y obtención de datos de alta calidad y resolución 3D de procesos a las escalas hidrodinámicas de Macroturbulencia, Oleaje de Viento, Ondas Largas, Corrientes; y el Transporte de Sedimentos en suspensión en la zona cercana a la costa -incluyendo la zona de rompientes-. Este trabajo formó parte de los experimentos de mayor escala del proyecto FANS (Flow Across Narrow Shelves "The Ebro Delta Case") de la Unión Europea, los cuales abarcaron medidas en un dominio más extenso del Mediterráneo Occidental, cubriendo un área de 75x50 km, desde el sur de Cap Salou, el Delta del Ebro, hasta las islas Columbretes, incluyendo varios subdominios a través de la plataforma (Inner Shelf, Shoreface/Surf Zone). El objetivo general de FANS fue estudiar los flujos de energía, agua, sedimentos y nutrientes a través de la plataforma.

La campaña en la zona costera fue realizada en conjunto por instituciones españolas y rusas; LIM/UPC, ICM/CSIC, CEPYC/CEDEX, Instituto Oceanográfico Gelendzik y el Instituto Oceanográfico Shirshov, ambos de la Academia de Ciencias de Rusia.

Durante los experimentos se midieron simultáneamente numerosas variables de distinto tipo como batimetrías, condiciones meteorológicas, hidrodinámicas (olas y velocidades), concentraciones de sedimentos en suspensión y transporte medio. Se han podido identificar patrones de circulación complejos, con superposición de estructuras típicas inducidas por el viento, superpuestas por corrientes debidas a la rotura del oleaje (corrientes longitudinal y de resaca suaves).

La zona de estudio seleccionada fue la playa de la barra del trabucador, en el Delta del Ebro, por ser una playa poco afectada por el hombre, por su geometría longitudinal cuasi-uniforme y por la disponibilidad de datos previos. Los experimentos Delta'96, se llevaron a cabo entre el 30/10/96 y el 10/11/96, y se centraron en la zona de rompientes

(ZR), desde la línea de orilla hasta una profundidad aproximada de 3 m, en un transecto frente a la barra del Trabucador en el hemidelta sur (figura 5.1). El tipo de costa seleccionada corresponde a una playa de arena fina ($d_{50} \approx 0.2$ mm) y longitudinalmente cuasi-uniforme con barras cuasi paralelas a la costa.

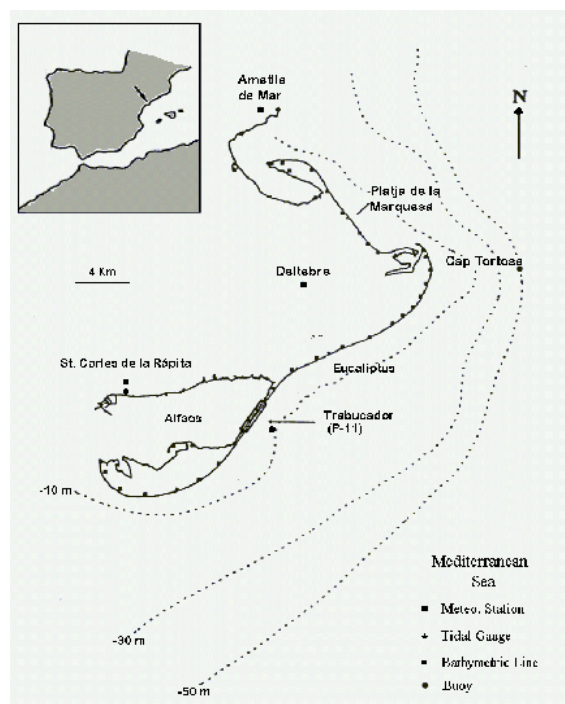


Figura 5.1.- Zona de estudio: Delta del Ebro.

La metodología general incluyó la medición detallada y simultánea de topografía, hidrodinámica, transporte de sedimentos y meteorología en la zona cercana a la costa, fuera de la zona de rompientes -como se resume en la tabla 5.1 y dentro de la misma, como se detallará más adelante.

Equipos	Distancia a la costa (m)	Prof. (m)	Sensores	Frec. Muestreo, Longitud intervalo de la Serie de Tiempo (min.) / (Hrs).
NS-Tripodes 1-2	1,500-3,000	8.5 – 12.5	3CEM, 3OBS, 1 sensor presión	2 Hz, 20min/3Hrs
SZ-Tetrápodo	150	3.5	1 CEM, 1 sensor presión	2-4Hz, 20min – 40min
DWR 1 y 2	1500-10000	8 - 50	Acelerómetros 3D	1.78 Hz, 20min / 3Hrs
Trampas Sedimento	50 - 200	de 1 a 3	recip. de captura	1-2 días
Vídeo IMG	0 - \approx 300	de 0 a 3-4	BN-color	50 Hz, 30 min

Tabla 5.1.- Equipos de medición fuera de la zona de rompientes.

El levantamiento de perfiles topo-batimétricos dentro de la ZR- hasta una profundidad máxima de 2 m- se realizó antes y después de los experimentos, con topografía convencional (estación total con distanciómetro infrarrojo y prismas ópticos), usándose además un trineo e imágenes aéreas de vídeo. Fuera de la ZR se realizó con métodos indirectos, usando zodiac y escandallo, con posicionamiento terrestre. Una vista del área de trabajo y su batimetría se presentan en la figura 5.2.

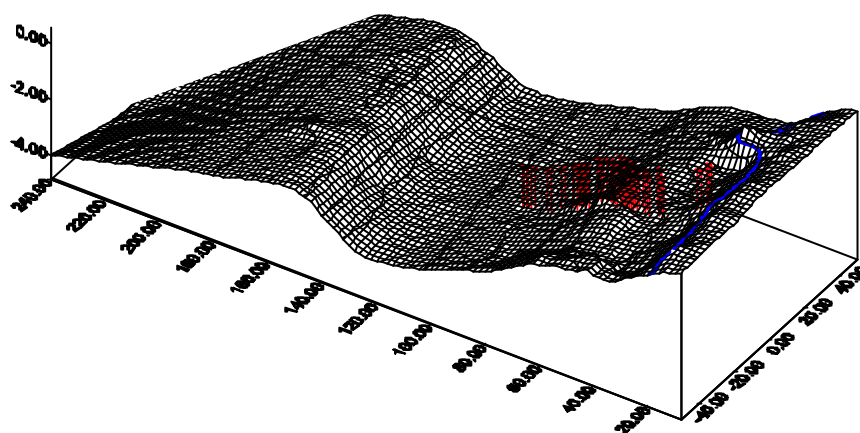


Figura 5.2.- Batimetría de la zona de medición, Barra del Trabucador. Las posiciones del trineo están señaladas con las líneas verticales.

El estudio de la hidrodinámica dentro y fuera de la zona de rompientes incluyó la obtención de medidas eulerianas a alta frecuencia (20 Hz) con sensores electromagnéticos en un trineo y en un tetrápodo, y medidas lagrangianas mediante el seguimiento espacial de boyas lastradas y trazadores (manchas de leche con fluoresceína) con equipo topográfico y con imágenes aéreas de vídeo respectivamente:

- Fuera de la zona de rompientes se midieron olas, nivel del agua (η) y velocidades horizontales mediante un conjunto de sensor de presión y un correntímetro electromagnético biaxial (el denominado sistema PUV) para corrientes en el plano horizontal (Interocean S4) situado a 1.5 m del fondo en un tetrápodo fondeado a 3.5 m de profundidad y aproximadamente a 150 m de la línea de orilla (ver figura 5.3). El oleaje se midió a una frecuencia de 4 Hz en registros continuos de 35 minutos cada hora. Las mareas y corrientes se obtuvieron promediando registros de 2 minutos cada media hora. Los datos de presión y velocidades fueron guardados en la memoria interna del aparato como archivos de vectores promediados en 2 minutos que permiten la obtención de niveles y corrientes medidas. Se dispuso también de medidas de oleaje direccional en alta mar en registro continuo con una boya direccional Datawell Waverider y medidas de oleaje, corrientes y sedimentos en suspensión con 2

trípodes fijos con 3 correntímetros electromagnéticos esféricos 2D tipo Delf P-S, 3 “Optical Back-Scatter” (OBS), 1 sensor de presión cada uno, además de baterías y un “Data logger” (Campbell-CR10) fondeados a una profundidad aproximada de 10 a 20 m. El período de medición fue de 1 mes aproximadamente (ver descripción en Jiménez *et al.*, 1997 y Guillén *et al.*, 1997).



Figura 5.3.- Tetrápodo con el sistema PUV fondeado 3.5 m.

- Dentro de la ZR se midieron olas, niveles, y velocidades con sensores montados en un trineo (sistema móvil de obtención de datos conducidos desde la costa) en 45 posiciones a lo largo de los experimentos (líneas verticales en la figura 5.2). Las medidas de velocidades y concentraciones de sedimentos en suspensión se realizaron mediante 8 correntímetros electromagnéticos (6 Delft y 2 Shirshov), y 2 turbidímetros (Shirshov), respectivamente, a una frecuencia de 20 Hz. durante 30 minutos, permitiendo la identificación detallada de la estructura vertical del flujo 3D en las escalas macro-turbulenta, de las olas de viento y flujo medio. Los niveles de agua se midieron mediante un sensor de contacto WG (Etrometa) apto para la ZR a frecuencia de 4 Hz. Simultáneamente a las medidas del trineo se utilizaron también trampas de sedimentos portátiles, trazadores (boyas y colorantes) e imágenes aéreas adquiridas mediante un sistema de filmación con videocámaras -1 Blanco y Negro y 1 Color- montadas en una grúa de 40 m de longitud (figura 5.4) que permitió filmaciones oblicuas de la zona de rompientes, y en un globo de 4 m de diámetro hinchado con helio, con el cual se filmó cenitalmente la zona de rompientes (figura 5.5).



Figura 5.4.- Cámaras de filmación montadas en una grúa de 40 m de longitud.



Figura 5.5.- Globo de 4 m de diámetro para filmaciones cenitales de la zona de rompientes.

El levantamiento de perfiles topo-batimétricos dentro de la zona de rompientes (hasta 2 m de profundidad) se realizó con topografía convencional (estación total con distanciómetro infrarrojo y jalones con prismas ópticos). Fuera de la zona de rompientes se realizó con métodos indirectos, usando una zodiac y un escandallo, siguiendo su posición con el teodolito.

Las condiciones atmosféricas fueron medidas simultáneamente en 3 estaciones permanentes cercanas (Sant Carles de la Rápita, Deltebre y CasaBlanca; ver figura 5.1) así como en la misma playa. Estas medidas fueron realizadas de dos maneras. Por una parte, mediante una estación meteorológica Aandera localizada en una torre de observación, aproximadamente a 10 m de altura sobre el nivel del mar y a 800 m de la zona de experimentos, midiendo continuamente datos de temperatura del aire, presión atmosférica, intensidad y dirección del viento en series de 10 minutos como media. Por otra parte, sensores de viento adicionales en el trineo (figura 5.6).



Figura 5.6.- Estación meteorológica colocada en el Trineo.

5.2.- Innovaciones y mejoras con respecto a la campaña Delta'93

En este apartado se destacan algunas mejoras e innovaciones metodológicas con respecto a los experimentos previos del LIM/UPC (Campañas Delta'93).

- Las medidas realizadas durante la campaña Delta'96 fueron más completas, ya que se realizaron medidas de olas y corrientes simultáneamente fuera y dentro de la zona de rompientes. En esta ocasión se dispuso de un correntímetro electromagnético colocado en un tetrápodo a una profundidad de 3.5 m a unos 150 m de la línea de orilla, con lo que se obtuvieron medidas en continuo de

series de velocidades (2DH) y presión. En la zona de rompientes se midió la estructura 3D del flujo, por lo que se colocaron en el trineo un total de 8 correntímetros electromagnéticos. Dos pares de ellos se instalaron al mismo nivel con el fin de medir $u-v$ y $u-w$, a 0.10 y 0.65 m del fondo permitiendo así conocer la estructura 3D y la capa límite del fondo. Los correntímetros electromagnéticos restantes se colocaron verticalmente a 0.05, 0.25 y 1 m del fondo para medir las componentes horizontales (ver figura 5.7).



Figura 5.7.- Disposición vertical de los correntímetros electromagnéticos colocados en el trineo.

- Se midieron también las concentraciones de sedimento en suspensión cerca del fondo. A lo largo del trineo y separados 1 m entre sí, a 0.10 m del fondo, se acoplaron 2 correntímetros electromagnéticos y los 2 turbidímetros que permitieron medir las fluctuaciones de concentración de sedimentos en suspensión asociados al flujo hidrodinámico (figura 5.8). De esta manera, es posible seguir el efecto del paso de cada ola y descomponer el flujo 3D medido en la capa límite del fondo en las distintas escalas hidrodinámicas de estudio asociando su contribución a la suspensión y transporte de sedimentos. Se agregaron además a las trampas de sedimento portátiles utilizadas dentro de la ZR durante Delta'93, un conjunto de 5 trampas de sedimentos fijas, que medían fuera de la ZR el transporte medio cerca del fondo.
- Las condiciones meteorológicas locales fueron medidas *in situ*, en la playa y el trineo.
- Se mejoró también la calidad de imágenes de vídeo. Además de la grúa de 40 m de altura, se utilizó un globo aerostático de 4 m de diámetro hinchado con helio,

donde se colocó una segunda cámara de vídeo a color, con lo que se obtuvieron filmaciones oblicuas y cenitales de la zona de estudio, (ver ejemplo en la figura 5.9) contrastando con la utilización previa de una única cámara en blanco y negro en una grúa de 20 m de altura durante Delta'93.

- La campaña fue de una mayor duración, ya que se prolongó durante 10 días, en los cuales se realizaron un total de 45 tests, con respecto a los 6 días y 12 tests de Delta'93.

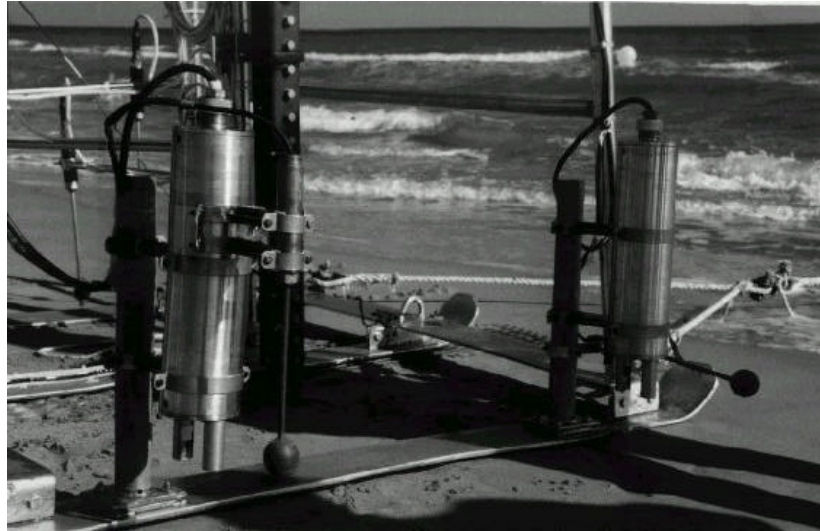


Figura 5.8.- Turbidímetros acoplados a los correntímetros electromagnéticos a 10 *cm* sobre el fondo.

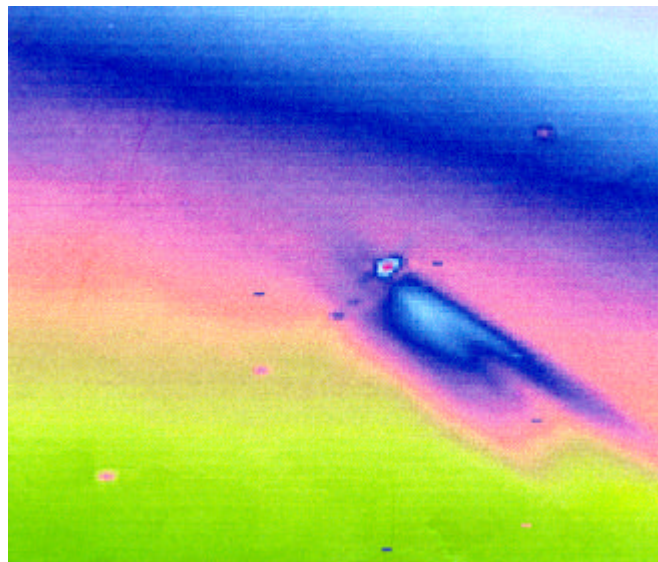


Figura 5.9.- Imagen digitalizada de una mancha de fluoresceína con lechea 5 minutos del vertido (03/11/96).

Los experimentos Delta'96 permitieron la obtención de un conjunto de datos armónico y completo, distribuido en los 8 Casos y 45 tests que presenta la tabla 5.2.

Día / Caso	Nro. Test	nombre: día - test - hora - min (GMT)								
02/10/96	3	02011250	02021610	02031715						
03/10/96	4	03010902	03021144	03031450	03042350					
04/10/96	6	04010900	04021000	04031047	04041127	04051207	04061250			
05/10/96	9	05011045	05021149	05031230	05041312	05051634	05062153	05072242	05082315	05092350
06/10/96	6	06010635	06021219	06031316	06041450	06052304	06062334			
07/10/96	8	07010858	07020939	07031019	07041059	07051142	07061220	07071516	07081609	
08/10/96	8	08010828	08020913	08030957	08041044	08051120	08061248	08071419	08081547	
09/10/96	1	09010832								
Total	45									

Tabla 5.2.- Tests realizados durante la campaña Delta'96 y día seleccionado para análisis detallado.

El tipo de medidas realizadas en cada test se detalla en la tabla 5.3

		Experimentos Delta'96											
Tarea		Días: 30/10 31/10 1/11 2/11 3/11 4/11 5/11 6/11 7/11 8/11 9/11 10/11											
Topografía	Inicial	■	■										
	Apoyo			■	■	■	■	■	■	■	■	■	
	Final										■	■	
Video	Globo (Video Color)				■	■							
	Grúa (Video B&N)			■	■	■	■	■	■	■	■	■	
	Grúa (Video Color)											■	
Trineo	Estación Meteorológica				■	■	■	■	■	■	■	■	
	Olas y Corrientes				■	■	■						
	Sedimentos				■	■	■		■	■	■	■	
Trampas	PST					■	■						
Sedimento	Trampas Fijas				■							■	
	Playa	Estación Meteorológica	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Tetrapodo	EMC + SP	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	

	Cont
	No Cont

Tabla 5.3.- Medidas realizadas durante los experimentos Delta'96.

5.2.1.- Variables ambientales durante la campaña Delta'96

En general, durante los días medidos el estado de mar fue de oleaje débil con viento medianamente intenso distribuido en forma brisas diarias. En particular, alrededor del día 05/11/96 tuvieron lugar las situaciones meteorológicas e hidrodinámicas de mayor interés para su estudio inicial y posterior simulación numérica. Como se observa en la figura 5.10, durante el día mencionado y coincidiendo con un descenso de la presión atmosférica, se produjo un aumento del nivel medio del mar de aproximadamente 0.10 m, (del mismo orden que la marea astronómica típica de 0.15 m).

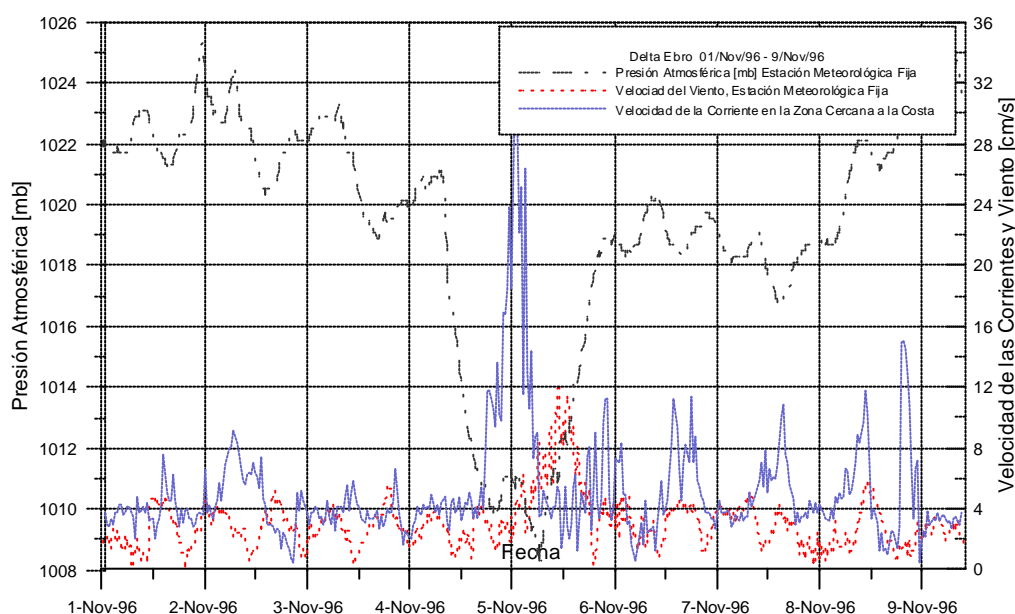


Figura 5.10.- Meteorología y nivel medio del mar durante Delta'96.

Se observa también un importante incremento de la corriente “exterior” fuera de la zona de rompientes en el tetrápodo (150 m de la orilla y 3.5 m de profundidad) con valores cercanos a 0.35 m/s a 1 m del fondo. Posteriormente se suceden dos estados denominados “de viento dominante” al medio día y tarde y “oleaje dominante” a la tarde-noche, con valores máximos de 12 m/s para el viento medio y de ≈ 0.7 m para la altura de ola significativa H_s . Este cambio de “estado de mar” puede apreciarse en la figura 5.11.

Durante el día seleccionado -05/10/96-, los test pueden agruparse en dos tipos distintos de estados de mar. El primero denominado “de viento dominante”, hasta el medio día (test 1 a 4), un caso intermedio a la tarde (test 5) y posteriormente “de oleaje dominante” (test 6 a 9) durante la noche.

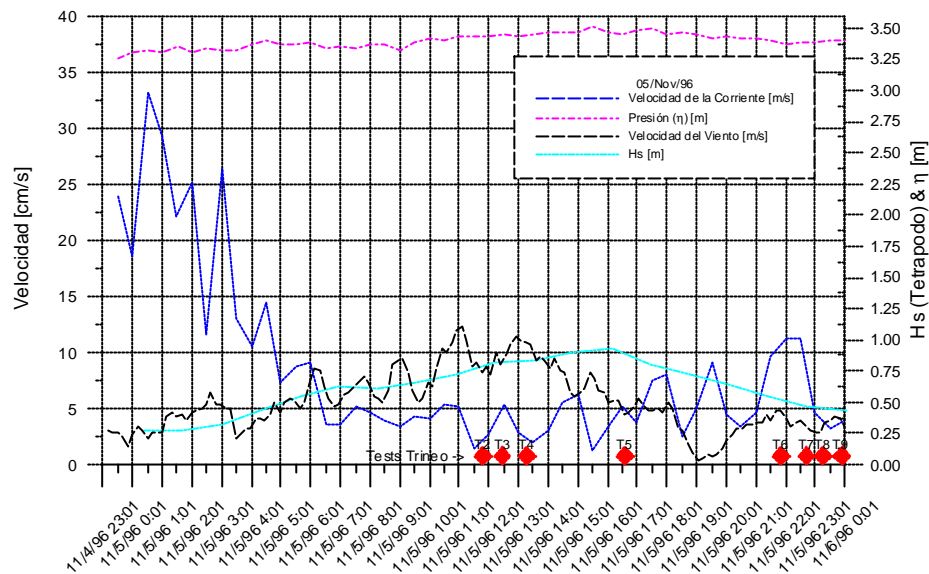


Figura 5.11.- Evolución del viento, oleaje, nivel medio y corrientes durante el día seleccionado (05/11/96).

El primer estado (de viento dominante) permite estudiar los mecanismos impulsores del viento, en particular suministrando datos para calibración de coeficientes de fricción/rugosidad del mar y la distribución vertical de *momentum*. En la figura 5.12 se pueden apreciar la variación de la presión atmosférica y las ráfagas de viento medidas durante el día 5 de noviembre. La figura 5.13 muestra los perfiles de las corrientes longitudinales a la costa impulsadas por el viento. Por otra parte, los tests nocturnos correspondientes al estado de “oleaje dominante” son de interés para el estudio de la estructura vertical de las corrientes longitudinales, en especial cerca del fondo (ver figura 5.14).

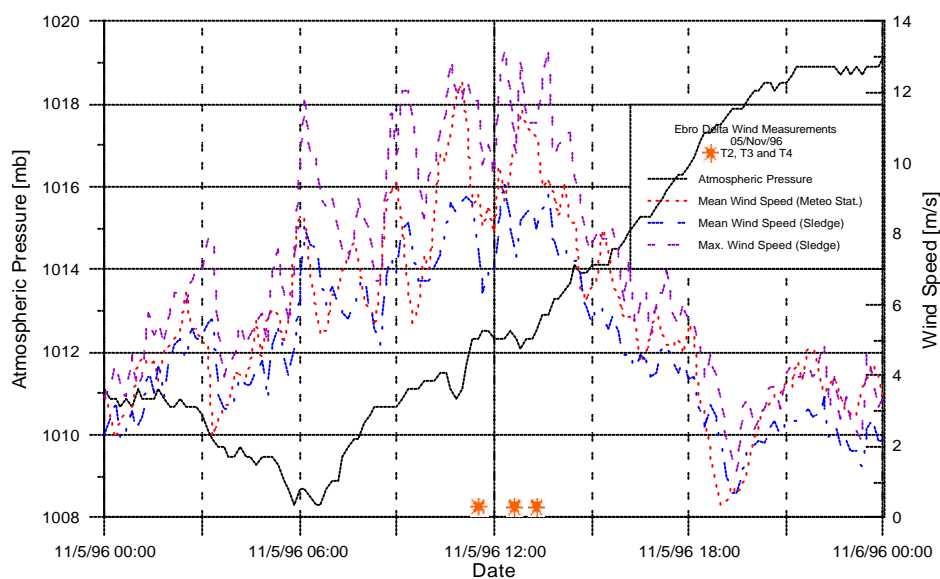


Figura 5.12.- Series de velocidades del viento medidas durante el día 5 de noviembre

Simultáneamente al análisis de los datos de oleaje y velocidades, se han obtenido las series correspondientes a los turbidímetros, cuyo ejemplo se ve en la figura 5.15, reflejando la consistencia de los datos instantáneos de velocidades orbitales y concentraciones de sedimento.

5.2.2.- Escalas de análisis

Los datos hidrodinámicos obtenidos serán analizados en 4 escalas denominadas:

- Macroturbulencia, con frecuencias superiores a aproximadamente 1 Hz.
- Flujo oscilatorio, correspondiente a las velocidades orbitales del oleaje de viento, comprendido entre frecuencias de 1 y 0.005 Hz. ($T \approx 20$ s).
- Ondas largas, para períodos comprendidos entre 20 y 300 s.
- Corrientes, para valores promediados entre 5 y 30 minutos.

Para varias de estas escalas, la disponibilidad de datos nuevos, y en particular de la componente vertical (e.g. w' , \tilde{w} y \bar{w}), permitirá la extensión de los estudios realizados previamente en la zona de rompientes (e.g. Rodriguez, 1997).

Una característica destacable de estos nuevos datos es su gran resolución cerca del fondo (5, 10 y 25 cm), la cual permite una observación detallada de la estructura vertical de la capa límite del fondo. En las tablas 5.4 a, b se presentan, los ajustes logarítmicos de los perfiles de la corriente longitudinal correspondientes a Delta'93 y Delta'96. Puede apreciarse que la mayor resolución de estos últimos se refleja en el mejor ajuste (R^2 mayor) de los perfiles cerca del fondo.

Finalmente, en este apartado de análisis de resultados preliminares se menciona el comportamiento observado en la componente vertical de la corriente. La misma es despreciable (menor a 1 cm/s equivalente al 0.4% de flujo medio horizontal) cuando la circulación es inducida por la rotura del oleaje. Mientras que para el caso de la circulación por viento alcanza valores mayores, de 1 a 3 cm/s, que representa entre un 27 y 63% del flujo medio horizontal (ver figura 5.13). Para completar este análisis de las velocidades verticales es necesario analizar los test correspondientes al punto de rotura y zona de "swash", donde antecedentes del laboratorio sitúan los máximos relativos (Nadaoka, 1986).

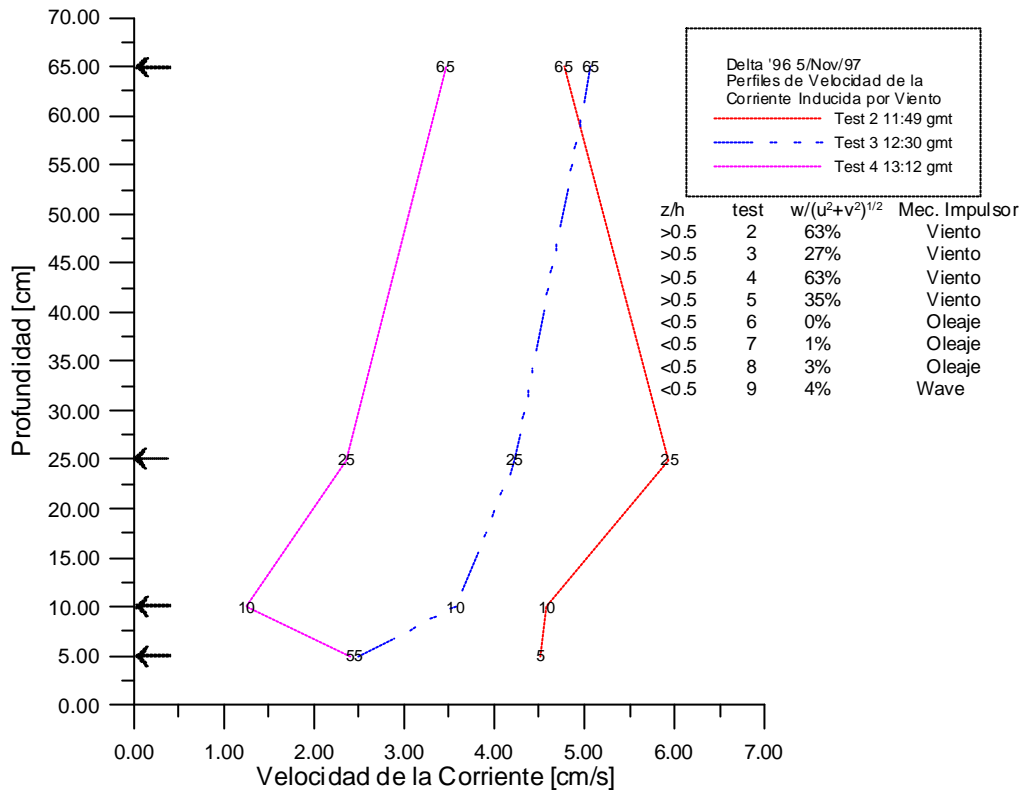


Figura 5.13.- Perfiles verticales de las corrientes longitudinales, caso de “viento dominante”. Mediciones diurnas; tests 2, 3 y 4 (5 de noviembre, 1996).

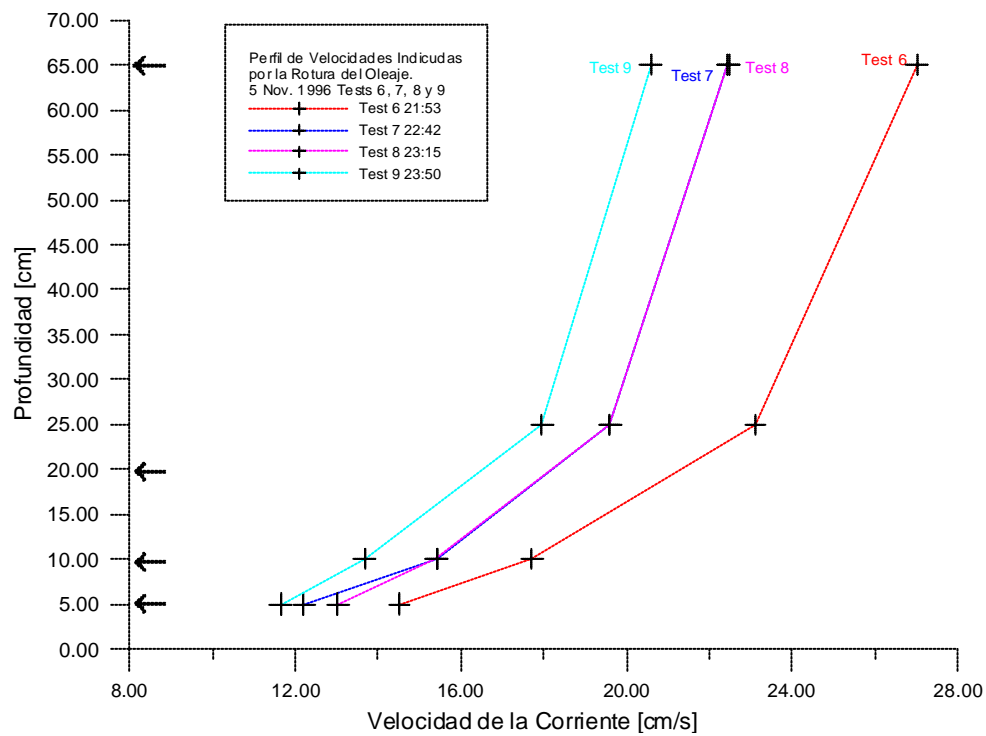


Figura 5.14.- Perfiles verticales de las corrientes longitudinales, caso de “oleaje dominante”. Mediciones nocturnas; tests 6, 7, 8 y 9 (5 de noviembre, 1996).

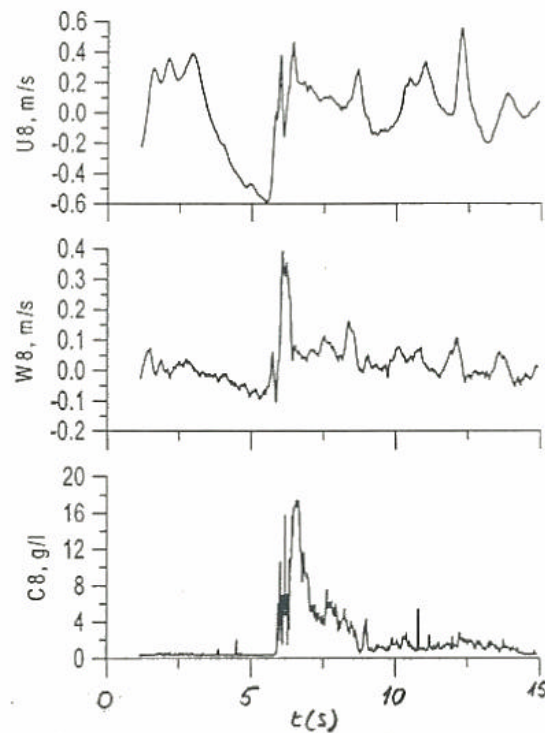


Figura 5.15.- Señales de concentración de sedimento en suspensión y componentes espaciales \tilde{u} y \tilde{w} de la velocidad.

DELTA'93 Test	$\text{Log } z'_0$	z'_0 (cm)	$K_w=30z'_0$ (cm)	k/u^*_{wc}	u^*_{wc} (cm/s)	coef corr	DoF
5	-1,8368	0,015	0,44	0,055	7,4	0,96	2
6	-1,6798	0,021	0,63	0,037	11,1	0,91	2
7	-1,4459	0,036	1,07	0,039	10,3	0,89	2
8	-1,2626	0,055	1,64	0,123	3,3	0,96	4
9	-2,8718	0,001	0,04	0,076	5,3	0,985	1
10	-0,6726	0,212	6,40	0,031	13,4	0,999	1
11	-1,1867	0,065	1,95	0,054	7,5	0,99	2
Experimental values: $\text{Log}(z) = k/u^*_{wc} V(z) + \text{Log}(z'_0)$							

DELTA'96 Test	$\text{Log } z'_0$	z'_0 (cm)	$K_w=30z'_0$ (cm)	k/u^*_{wc}	u^*_{wc} (cm/s)	coef corr	DoF
6	-0,568	0,271	8,12	0,087	4,7	0,997	2
7	-0,646	0,226	6,77	0,108	3,8	0,995	2
8	-0,803	0,157	4,72	0,115	3,6	0,996	2
9	-0,690	0,204	6,12	0,120	3,4	0,994	2
Experimental values: $\text{Log}(z) = k/u^*_{wc} V(z) + \text{Log}(z'_0)$							

Tablas 5.4 a, b.- Ajustes logarítmicos de los perfiles de la corriente longitudinal medida en Delta'93 y Delta'96.

5.2.3.- Post-proceso de datos

El post-proceso de datos suele ser el último paso de una campaña de medidas y es, además de laborioso, clave para obtener datos de alta calidad. En la primera fase de la depuración se eliminan los errores que pueden existir en las series de datos y se presenta la información detallada de la obtención de los datos y la metodología a seguir en el post-proceso. En la segunda fase se requiere de un análisis detallado sobre el fenómeno en particular que se quiere investigar para determinar el método más adecuado de separación de escalas, análisis espectral, etc.

De forma general, el tratamiento de las series temporales se realizó en 4 pasos, que se mencionan a continuación:

- i.* Depuración primaria: en este paso se eliminan los datos erróneos (fuera de rango o ruido) que (comúnmente) se presentan en las series brutas.
- ii.* Depuración secundaria: se corrigen los “ceros” de escala en el sensor de alturas de ola (wave gauge), y se rellenan los huecos de las series mediante interpolación. Como estas discontinuidades solo se presentaron en intervalos cortos de la serie de alturas de ola, la interpolación fue lineal entre los valores correctos de dicha discontinuidad. En lo referente a las series de las velocidades, estos se corrigen de forma que queden proyectados en coordenadas N-E. Este paso se realizó para corregir las variaciones en la posición y orientación del trineo durante los tests debidas al golpeo del oleaje sobre la estructura.
- iii.* El tercer paso consiste en la extracción de las series temporales en determinados puntos o intervalos de interés a partir de las series corregidas (N-E). Estas series pueden ser extraídas con frecuencias diferentes a la frecuencia de muestreo y proyectadas en un sistema de referencia local, por ejemplo, en el sistema longitudinal y transversal a la costa, para estudiar las corrientes referidas a la orientación de la playa, o en referencia a la dirección de aproximación del oleaje, para el estudio del flujo oscilatorio del oleaje incidente.
- iv.* El cuarto paso es el análisis estadístico y espectral de las series en las distintas escalas temporales.

5.3.- Turbulencia

La complejidad de la estructura hidrodinámica en la zona de rompientes radica en que coexisten fenómenos cuyas escalas hidrodinámicas son distintas y se encuentran solapadas. Al medir una serie de tiempo de velocidades en la zona de rompientes se obtendrá un registro con las aportaciones de la turbulencia, del flujo oscilatorio (asociado al oleaje), corrientes (impulsadas tanto por la rotura del oleaje como por el viento) y ondas largas atrapadas en la costa. En términos generales, se puede decir que las corrientes van asociadas a un movimiento no oscilatorio del fluido, y sus características varían muy lentamente en comparación con el flujo oscilatorio asociado al oleaje (que es un movimiento razonablemente organizado) o con la turbulencia (flujo no organizado altamente aleatorio, que es el resultado final de una cascada de procesos

por los cuales, la energía transmitida a la superficie del mar se propaga hasta la costa en forma flujos de alta frecuencia). La importancia del estudio de la turbulencia en la zona de rompientes radica en el papel que esta juega en los procesos de cambio más importantes que ocurren en una playa.

En éste trabajo se propone un método de separación de escalas, para obtener la aportación de la turbulencia por separado de las otras escalas hidrodinámicas anteriormente señaladas. El objetivo principal en esta sección es la separación y determinación de las escalas hidrodinámicas relacionadas con la turbulencia y el análisis estadístico de las características espaciales y temporales de la turbulencia dentro de la zona de rompientes, utilizando los datos de la campaña Delta'96.

5.3.1.- Antecedentes de la separación de escalas hidrodinámicas

En la literatura hay varias propuestas metodológicas para la separación de escalas, entre las que cabe destacar las siguientes:

- i.* Promediado en la fase o por realizaciones, en el que la turbulencia se define como la desviación del flujo en una determinada fase del movimiento medio (en un determinado número de ciclos). Esta metodología ha sido utilizada por Stive (1980), Aono *et al.* (1982), Cox *et al.* (1994) o Ting & Kirby (1994). Este método es solo adecuado para oleaje regular, por lo que su aplicación a playas naturales es discutible.
- ii.* Filtros
 - a. De banda, analógicos en el dominio de la frecuencia, utilizado por Nadaoka (1986) o digitales como Aono & Hattori (1987) o Rodríguez *et al.* (1995).
 - b. Numéricos de media móvil utilizados por Nadaoka (1986) u Okayasu (1989).

Estos métodos tienen los inconvenientes de precisar la frecuencia de corte específica (que no se sabe "a priori") y de que los métodos de filtrado pueden introducir distorsiones, tanto en la frecuencia máxima como en la mínima a la que se quiere filtrar la serie, como en frecuencias múltiples del valor de corte. En el caso de los filtros de media móvil, estos producen un suavizado de la serie original y no detectan la presencia de macrovórtices si la ventana de promediado es muy corta o no pueden filtrar el flujo oscilatorio si la ventana de promediado es muy larga.

- iii.* Coherencia, donde la velocidad turbulenta se define como el flujo no coherente con la superficie libre del mar (es decir, hay una relación directa entre la superficie libre y el flujo oscilatorio). No obstante, esta definición tiene el inconveniente de que los macrovórtices turbulentos pueden afectar a la superficie libre (Nadaoka, 1986), por lo que este método solo es fiable para separar la turbulencia de alta frecuencia (los macrovórtices turbulentos pueden tener las mismas escalas espacio-temporales que el flujo oscilatorio). Otra limitación es que la coherencia entre la superficie libre y el flujo oscilatorio se puede ver afectada por efectos no-lineales (Horikawa, 1988) debidos a la

deformación del oleaje (que es especialmente evidente en las cercanías de la zona de rompientes).

- iv. Mediante la estimación de la tasa de disipación de energía y el espectro del número de onda de la turbulencia (George *et al.*, 1994). Este método precisa más contraste e investigación para mejorar las incertidumbres que presenta.
- v. Combinación de metodologías (Rodríguez *et al.*, 1995; Rodríguez, 1997). Esta metodología consiste en una combinación de técnicas de filtrado digital (2a) cuya frecuencia de corte se obtiene a partir del método de la coherencia (4).

5.3.2.- Método de separación de escalas propuesto por Rodríguez (1997)

Primero se obtiene el espectro de energía de la superficie libre, S_{η} , asumiendo que, al estar muestreada a una frecuencia de 4 Hz, su registro se debe a oleaje puro (que no está medida la turbulencia). Mediante una función de transferencia, se calcula el espectro de velocidades teórico correspondiente al flujo oscilatorio, $S_{\text{vorb-t}}$. Posteriormente se comparan estos dos espectros con el espectro de las velocidades obtenidas de los correntímetros, $S_{\text{vorb-m}}$, (muestreando a 20 Hz), con los que se ha medido tanto flujo oscilatorio como velocidades turbulentas (hasta 10 Hz). La superposición de estos espectros permite detectar en que valor de frecuencia la energía de la velocidad total se separa la turbulencia, ya que ésta estará presente en la serie de tiempo medida y no lo estará en el espectro teórico. El punto donde ambos espectros se corten corresponderá a la frecuencia de corte.

La transformación del espectro de niveles de superficie libre en el espectro de velocidades orbitales teóricas se realizó utilizando una función de transformación basada en teoría lineal:

$$S_{\text{vorb-t}} = [Hu(f)]^2 S_{\eta}(f) \quad [5.1]$$

donde la función de transferencia es:

$$Hu(f, z) = 2\pi \frac{\cosh\left(\frac{2\pi z}{L}\right)}{\sinh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)} f \quad [5.2]$$

donde L es la longitud de onda, h es el calado y z la distancia entre el correntímetro y el fondo.

Esta determinación de la frecuencia de corte se basa en los siguientes puntos:

- El espectro teórico $S_{\text{vorb-t}}$ decae mas rápidamente que el espectro de velocidades medidas, al no tener el aporte de energía de los vórtices generados en la rotura del oleaje, de forma que se puede obtener fácilmente la frecuencia de corte de ambos espectros.
- La rotura del oleaje correspondiente en los casos analizados fue mayoritariamente tipo “*spilling*”, el cual se ha observado que prácticamente no origina perturbaciones importantes en la superficie libre, no así la rotura tipo “*plunging*”, que si puede dejar “huellas” en la superficie.
- El sensor de alturas de ola utilizado no detecta los pequeños efectos superficiales de los marcovórtices al muestrear el nivel de la superficie libre con una resolución espacio-temporal relativamente baja (± 2.5 cm a 4 Hz).

Una vez hallada la frecuencia de corte, la separación de las escalas se realizó mediante un filtro digital en una banda comprendida entre la frecuencia de Nyquist, que corresponde a la mitad de la frecuencia de muestreo (10 Hz en este caso) y la frecuencia de corte (determinada con la superposición de los espectros). En todos los casos, el valor medio de la frecuencia de corte entre el flujo oscilatorio y la turbulencia fue cercano a 1 Hz ($\approx T = 1$ seg).

A pesar de la fortaleza “teórica” de este método, es importante destacar algunos de los puntos “débiles”:

- La función de transferencia adoptada (H_u) está basada en teoría lineal, con lo cual su aplicación en la zona de rompientes es discutible.
- El filtrado numérico puede resultar “engañoso” debido a que es muy sensible, tanto al tamaño de la ventana de datos para su análisis, como a la frecuencia de corte. En este caso, se utilizó un filtro numérico desarrollado en el LIM/UPC llamado Bandfilt.
- En la zona de rompientes \exists existen varias escalas hidrodinámicas, pero es especialmente cierto para el caso de los marcovórtices turbulentos y el flujo oscilatorio asociado al oleaje. Por lo tanto, la energía turbulenta obtenida con esta metodología puede estar siendo subestimada, debido a que los macrovórtices turbulentos cuya frecuencia característica sea menor que la frecuencia de corte determinada por la superposición de los espectros pueden no estar siendo tenidos en cuenta.

5.3.3.- Metodología propuesta para la separación de escalas hidrodinámicas.

Esta metodología es similar a la descrita anteriormente (ya que también es una combinación de los métodos *ii* y *iv* descritos en los antecedentes). Para aplicar esta metodología es necesario que se cumplan los siguientes requisitos:

- i.* Medidas de las elevaciones de la superficie libre realizadas con una frecuencia de muestreo no superior a los 4 Hz.
- ii.* Medidas de la velocidad vertical a una frecuencia de muestreo que permita encontrar tanto el flujo oscilatorio como la turbulencia (alrededor de 20 Hz).
- iii.* Sincronización entre las medidas de la elevación de la superficie libre y de las velocidades verticales.

Aquí se propone la obtención de la frecuencia de corte a partir del registro de elevaciones de la superficie libre, donde se obtienen las velocidades verticales en la superficie libre (considerando la diferencia entre dos elevaciones consecutivas dividida por el intervalo de tiempo entre dichas medidas):

$$w_i = \frac{\eta_{i+1} - \eta_i}{\Delta t_{(\text{mtr})}} \quad [5.3]$$

donde w_i es la velocidad vertical generada y η_i la superficie libre.

Por lo tanto, se generan dos registros de velocidades verticales, uno operando a partir de las medidas de la superficie libre y con medidas a 4 Hz (midiendo sólo las variaciones de η debidas al paso del oleaje) y el otro obtenido a partir de las medidas del correntímetro electromagnético colocado en el trineo, a una frecuencia de 20 Hz.

En lo referente al análisis espectral de las series, debe advertirse que no es un proceso trivial (como ha quedado destacado en el apartado del post-proceso de datos). Como se ha explicado antes, las series obtenidas en la campaña Delta'96 fueron de 30 minutos a 20 Hz (correntímetros) y 4 Hz (sensor de oleaje). Con estas frecuencias de muestreo se obtienen series de 7200 datos (en el caso del sensor de oleaje) y 36000 datos (para los correntímetros). Para aplicar la FFT a los datos de oleaje, los valores correspondientes a la longitud de la serie para analizar se encuentran entre 2^{12} datos (4096) y 2^{13} datos (8192). En caso de escoger como longitud de la serie el límite inferior, se deja fuera del análisis el 43% de la serie, es decir, solo se analizan 17 minutos de los 30 que se han medido. Como se mencionó en el capítulo 2, en el análisis del oleaje se recomienda utilizar series de 30 minutos, pues esta longitud cumple con el requisito de ser lo suficientemente corta como para que el estado de mar sea aleatorio, gaussiano y estacionario, y lo suficientemente larga como para que sea estadísticamente representativa. De tal manera que no se recomienda el uso de 2^{12} como longitud de la serie para el estudio espectral.

Para no perder tanta información, se ha procedido a quitar la tendencia de la serie y (tal cual se ha recomendado), rellenar la serie con “ceros” hasta alcanzar los 8192 datos. De esta manera se utilizan todos los datos.

Otro punto importante a tener en cuenta en el análisis de los datos, es el número de datos/grupo. A mayor número de datos por grupo (y por lo tanto menor número de grupos), se obtiene una mayor resolución espectral (menor incremento de la frecuencia).

En contrapartida, a menor número de datos por grupo (más grupos) la resolución espectral baja, aunque la precisión de los cálculos es mayor.

El espectro obtenido a partir de las medidas a 20 Hz mide, además de las aportaciones (energía) de las escalas hidrodinámicas de baja frecuencia (olas, corrientes y ondas largas), las de alta frecuencia (hasta 10 Hz). El espectro obtenido a partir de las medidas del sensor de oleaje (4 Hz), refleja únicamente las aportaciones del oleaje. Encontrando pues el punto de corte en el cual el espectro de las aportaciones del oleaje queda por debajo del espectro de los correntímetros, se establecerá la frecuencia de corte aproximada de separación entre el flujo oscilatorio y la turbulencia. Todas las aportaciones con frecuencias mayores a la frecuencia de corte serán consideradas como turbulencia. Con este valor de la frecuencia de corte se puede aplicar el filtro numérico Bandfilt para separar la componente turbulenta del resto. Una vez obtenida la serie de tiempo de la turbulencia, se comprobará si este registro cumple con las características que se le suponen.

Los tests analizados para encontrar la frecuencia de corte de la turbulencia son los que se realizaron entre los días 5 y 9 de noviembre de 1997 (ya que debido a problemas técnicos con el sistema de adquisición de datos, los tests realizados del 2 al 4 de noviembre solo registraron alturas de ola).

De los 28 tests con corrientes y alturas de ola, en 12 de ellos la forma de los espectros impedía encontrar una frecuencia de corte evidente debido a que los espectros presentaban un pico inicial muy marcado, y luego decaían muy rápidamente, por lo que las frecuencias de corte rondaban los 0.7 Hz (cuando la frecuencia de corte esperada “a priori” debe de ser cercana a 1 Hz, de acuerdo con los resultados de Rodríguez, 1997 y Möso *et al.*, 1998b). Estos 12 tests fueron descartados para su análisis.

Las figuras 5.16 y 5.17 son dos ejemplos de las frecuencias de corte obtenidas a partir del análisis espectral de velocidades medidas y las calculadas a partir de la ecuación [5.3].

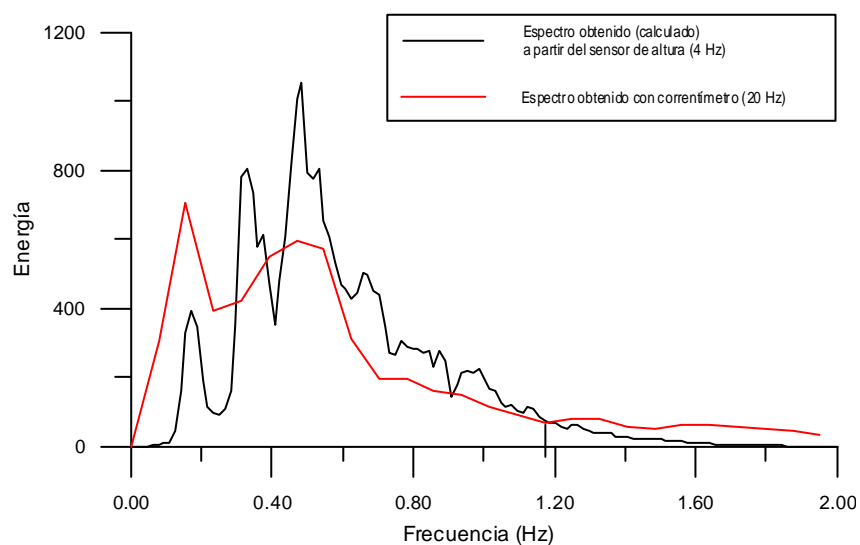


Figura 5.16.- Frecuencia de corte obtenida para el test 05021149.

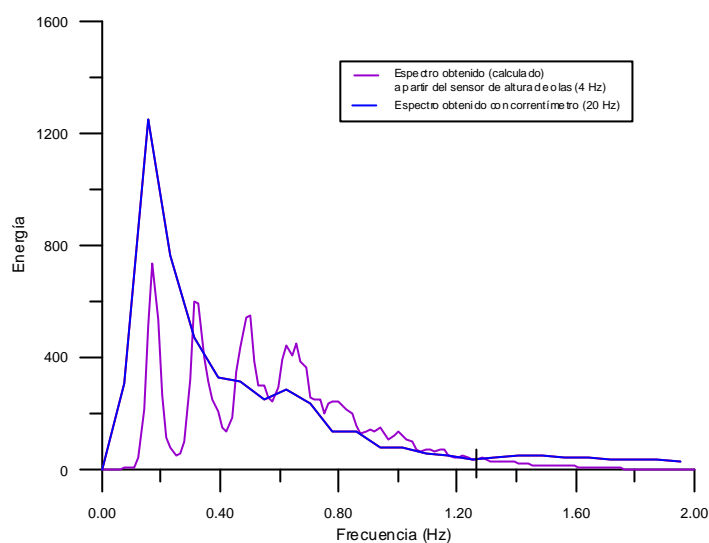


Figura 5.17.- Frecuencia de corte obtenida para el test 05041312

Los resultados de las frecuencias de corte obtenidas a partir de la metodología descrita se presentan en la tabla 5.5:

Test	Frecuencia de Corte
05021149	1.05
05031230	0.95
05041312	1.25
05051634	1.12
06031315	0.95
06041450	1.20
06051530	0.80
07020939	1.05
07031019	1.00
07041059	1.00
07051142	1.12
07061220	1.25
08030957	0.87
08051120	1.08
08081547	1.07
09010832	1.30

Tabla 5.5.- Frecuencias de corte para la turbulencia obtenida a partir de los datos de la campaña Delta'96.

5.3.4.- Filtrado de la serie de velocidades

A partir de la frecuencia de corte obtenida en el apartado anterior, se utiliza el filtro numérico para filtrar las series de los correntímetros y separar la turbulencia de la escala

de flujo más próxima, que es el flujo oscilatorio asociado al oleaje. Al aplicar el filtro a las velocidades, se puede observar que la serie correspondiente a las velocidades del flujo oscilatorio es más suave que las velocidades “totales” (figuras 5.18, 5.19 y 5.20). La serie de la turbulencia en general se reduce a pequeñas oscilaciones con múltiples picos, y como era de esperar, se observaron series mas intensas de turbulencia cuando el oleaje era mayor.

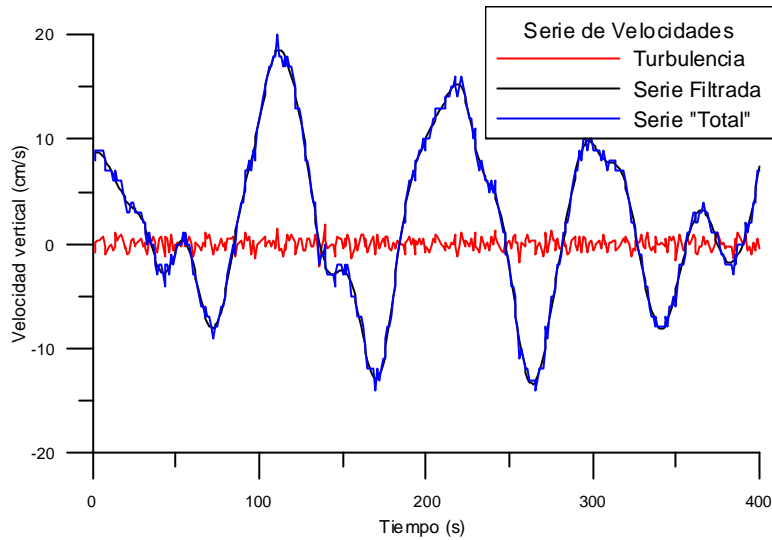


Figura 5.18.- Series Total, Filtrada y Turbulenta. Test 05051634.

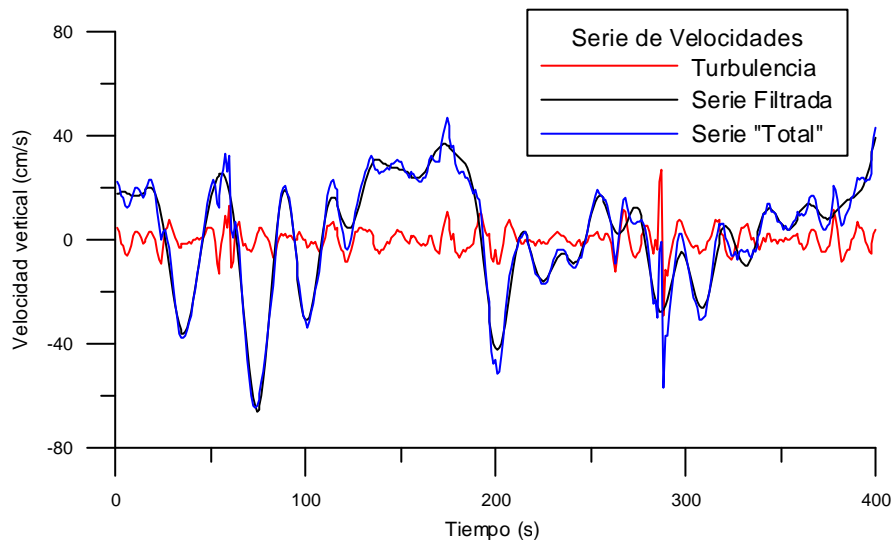


Figura 5.19.- Series Total, Filtrada y Turbulenta. Test 07041059.

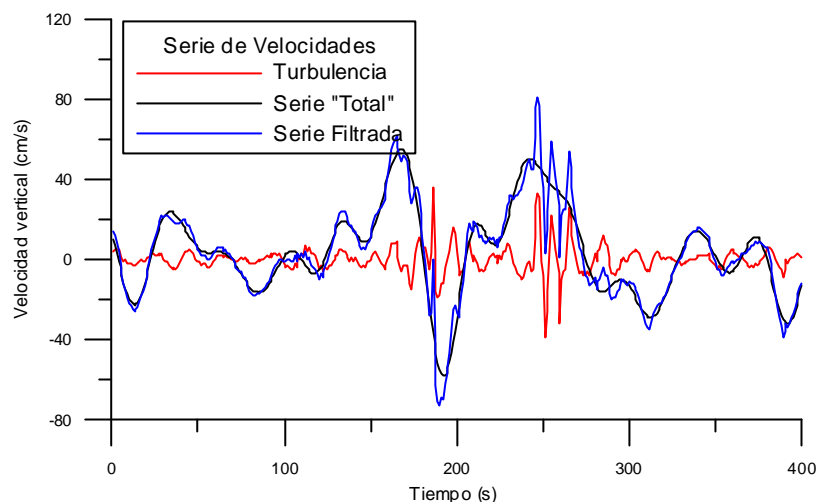


Figura 5.20.- Series Total, Filtrada y Turbulenta. Test 08030957.

5.3.5.- Análisis de Resultados

Una vez obtenidas las series de tiempo correspondientes a la turbulencia, debe comprobarse que efectivamente lo son. Un primer paso para comprobar si el filtrado ha sido el adecuado, consiste en realizar la media de las series de tiempo, que por definición, si es turbulencia, debe ser igual a cero. La tabla 5.6 muestra los resultados de la media de las velocidades turbulentas obtenidas a partir del filtrado de las series.

Test	Media de las series Turbulentas
05021149	0.00244396
05031230	0.00027593
05041312	0.00098864
05051634	0.00001739
06031315	-0.00510415
06041450	-0.00057819
06051530	-0.00084595
07020939	-0.00422312
07031019	0.00428833
07041059	0.00080337
07051142	0.00045688
07061220	-0.00854322
08030957	-0.00039675
08051120	0.00020509
08081547	0.00009854
09010832	-0.00070548

Tabla 5.6.- Media de las series turbulentas obtenidas a partir de la frecuencia de corte determinada a partir del análisis espectral.

Como puede observarse, los valores de la media de la serie de velocidades turbulentas son muy cercanos a cero. Otra forma de comprobar la serie obtenida, es a partir de de su espectro de energía-frecuencia en escala logarítmica, donde queda claramente representado el hecho de que la energía se transmite casi integralmente de vórtices de una longitud determinada a vórtices cada vez mas pequeños con otra longitud, y así sucesivamente hasta que la viscosidad disipa la energía en forma de calor.

Existen varias zonas características del espectro típico de un flujo turbulento, cuya dependencia con el número de onda puede obtenerse teóricamente. Así, Kolmogorov obtuvo, mediante análisis dimensional, que la zona entre los vórtices de mayor energía y la disipación viscosa corresponde a una región llamada de subrango inercial, que sólo depende de la disipación de energía por unidad de masa ε y del número de onda k :

$$E(k) \propto \varepsilon^{\frac{2}{3}} k^{-\frac{5}{3}} \quad [5.4]$$

De este modo, si se obtiene el espectro de energía de la serie turbulenta (en escala logarítmica), y se consigue identificar una pendiente próxima a $-5/3$, es posible afirmar que se trata realmente de turbulencia. Las figuras 5.21 y 5.22 muestran dos ejemplos del espectro de energía obtenido para las series turbulentas de los tests 05021149 y 07051142.

Realizando una comparación entre la energía total de las series del flujo oscilatorio extraídas de los correntímetros y las series de la turbulencia, se ha obtenido la relación entre la energía correspondiente a la turbulencia y la energía correspondiente al flujo oscilatorio (tabla 5.7).

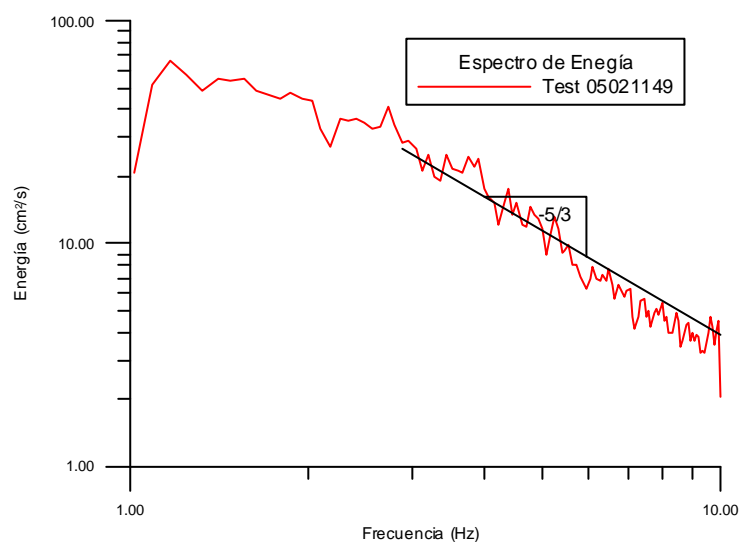


Figura 5.21.- Espectro de energía de la serie turbulenta (test 05021149).

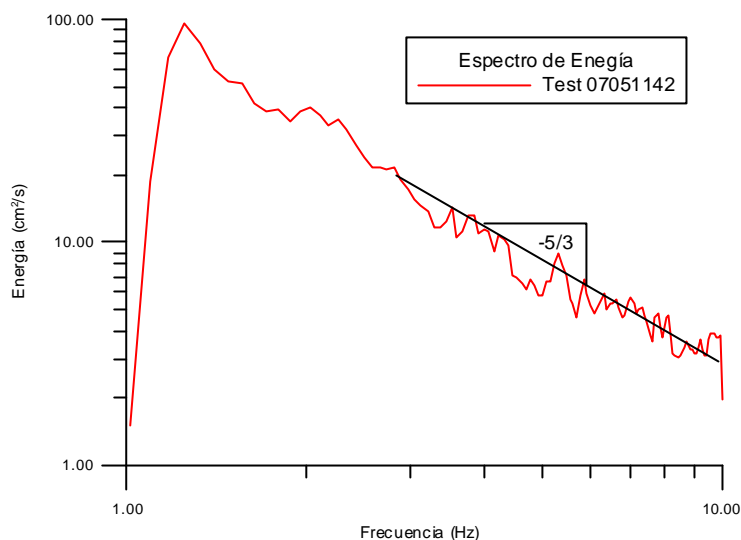


Figura 5.22.- Espectro de energía de la serie turbulenta (test 07051142).

Test	Relación entre la Energía de la Turbulencia y el Flujo Oscilatorio
05021149	0.09
05031230	0.06
05041312	0.13
05051634	0.005
06031315	0.04
06041450	0.08
06051530	0.08
07020939	0.11
07031019	0.13
07041059	0.07
07051142	0.09
07061220	0.15
08030957	0.08
08051120	0.17
08081547	0.14
09010832	0.04

Tabla 5.7.- Relación de energía correspondiente a la turbulencia con respecto de la energía correspondiente al flujo "total".

Kuznetsov y Speranski (1990), midieron las componentes turbulentas (horizontales y verticales) para distintos tipos de rotura, y compararon la energía del flujo oscilatorio y de la turbulencia, encontrando relaciones del orden de $E_{\text{turb}}/E_{\text{oleaje}} \approx 0.04$ en ausencia de rotura, y un orden de magnitud mas, $E_{\text{turb}}/E_{\text{oleaje}} \approx 0.14$, en presencia de rotura tipo *plunging*. Por su parte, George *et al.*, (1994) en experimentos realizados en la playa de la Jolla en 1992, encontrando valores menores que Kuznetsov y Speranski (1990), del orden de $E_{\text{turb}}/E_{\text{oleaje}} \leq 0.01$, mientras que Rodríguez (1997) encontró valores de

$E_{\text{turb}}/E_{\text{oleaje}} \leq 0.06$ con rotura tipo *spilling*. Estas diferencias en la relación entre la energía turbulenta y la energía del oleaje pueden deberse al tipo de rotura presente durante los experimentos mencionados anteriormente. Por lo que respecta al análisis, puede observarse que los resultados obtenidos superan ligeramente los límites señalados anteriormente, alcanzándose un máximo de $E_{\text{turb}}/E_{\text{oleaje}} = 0.17$ para el test 08051120. En contrapartida, el valor $E_{\text{turb}}/E_{\text{oleaje}} \leq 0.005$ es muy pequeño, debido probablemente a que el oleaje no estaba rompiendo.

5.3.6.- Análisis Temporal y Espacial

Una vez comprobado que el método de separación de escalas es válido, se procede a encontrar las escalas espaciales y temporales de la turbulencia, así como otras propiedades que se describen a continuación.

5.3.6.1.- Escala temporal de la turbulencia

La escala temporal (τ) o escala Lagrangiana de la turbulencia representa la escala de transferencia de la energía desde los macrovórtices turbulentos hacia los vórtices cada vez más pequeños. Como se mencionó en el capítulo 2, la escala temporal de la turbulencia se expresa como:

$$\tau = \int_0^{\infty} a_c(\tau) d\tau \quad [5.5]$$

donde $a_c(\tau)$ representa la función de autocorrelación normalizada¹, que es la correlación de la señal turbulenta consigo misma, es decir:

$$a_c = \left\langle \frac{u'(t)u'(0)}{u'^2} \right\rangle \quad [5.6]$$

separada por un intervalo de tiempo igual a la frecuencia de muestreo de la señal y donde $\langle u'^2 \rangle$ es la varianza del registro. En otras palabras, la autocorrelación de la serie de velocidades consiste en alinear la serie $u(t)$ con $u(t + \tau)$ como se muestra en la figura 5.23 y multiplicarla verticalmente.

¹ En general, cuando el proceso es estacionario, la estadística (los distintos tipos de promediado) son independientes del origen del tiempo, con lo cual el origen del tiempo puede cambiarse por cualquier otro valor. De tal manera, se puede cambiar el origen de la serie por t , la función de autocorrelación $R(t_1, t_2) \equiv \langle u(t_1)u(t_2) \rangle$ se redefine como $\langle u(0)u(t_2 - t_1) \rangle = \langle u(0)u(\tau) \rangle$, donde $\tau = (t_2 - t_1)$ es el intervalo de tiempo entre las velocidades a correlacionar. El operador $\langle \rangle$ debe considerarse como el promedio.

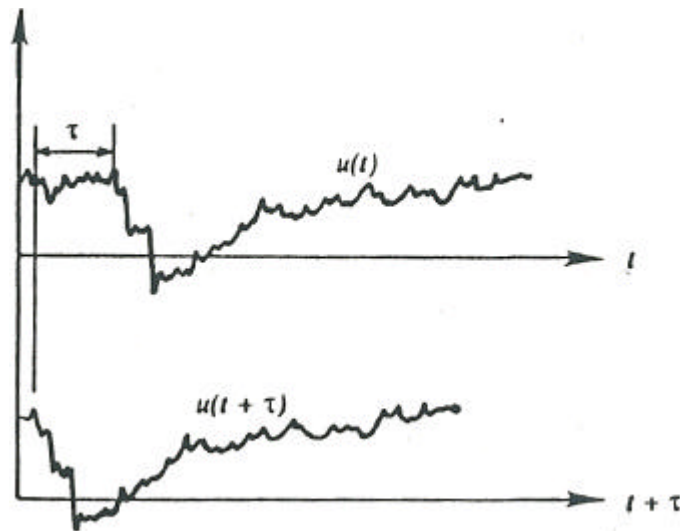


Figura 5.23.- Método para el cálculo de la autocorrelación $\langle u(t)u(t + \tau) \rangle$ (Van Rijn, 1990).

Por lo tanto, de las series escogidas para el análisis de la turbulencia es posible obtener la escala temporal característica. En la práctica, la integración de la ecuación [5.6] se realiza en un intervalo finito máximo razonable de tiempo, generalmente el periodo del oleaje. Para realizar el análisis con los registros de velocidades se han tomado 90 intervalos que equivalen a: $90 \times 0.05 \text{ s}$ (frecuencia de muestreo) = 4.5 s. Las figuras 5.24 y 5.25 muestran la función de autocorrelación para los tests 05021149 y 05041312.

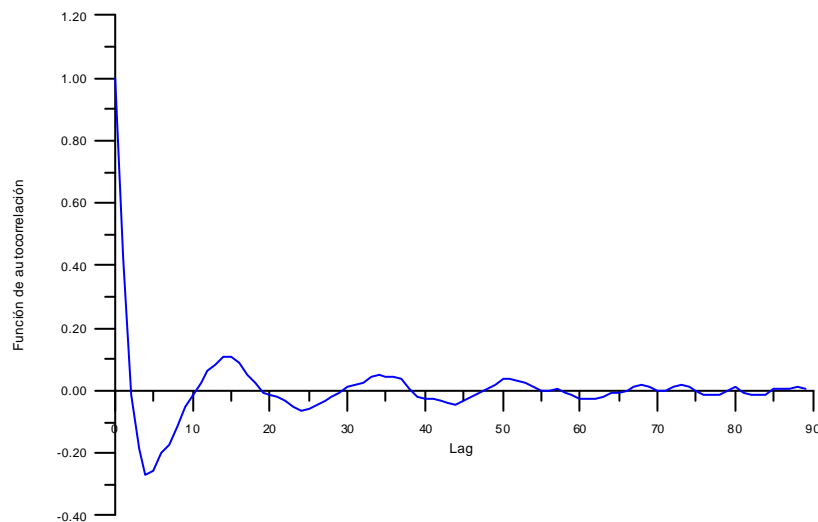


Figura 5.24.- Función de autocorrelación para el test 05021149.

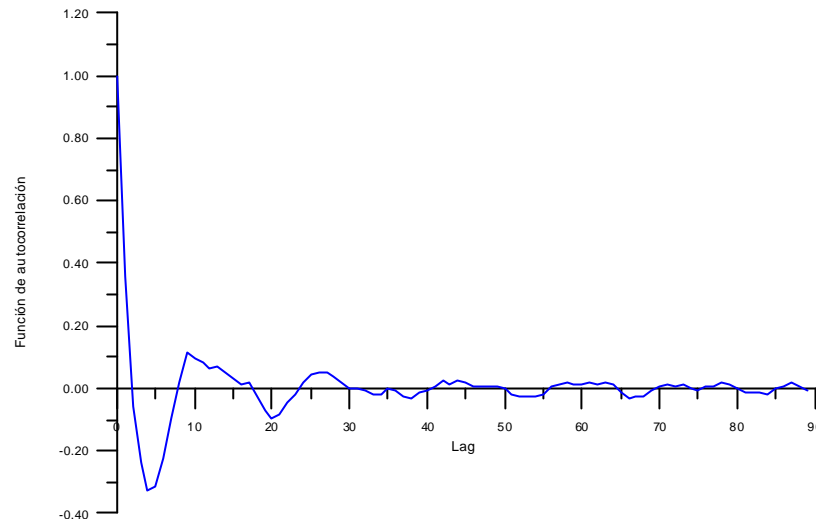


Figura 5.25.- Función de autocorrelación para el test 05041312.

Como puede observarse de las figuras, la función de autocorrelación tiende a cero conforme τ tiende a infinito, lo cual es esperable, puesto que el proceso deja de correlacionarse consigo mismo después de un cierto tiempo. Para medir la anchura de la función de autorcorrelación, se puede reemplazar la distribución de autocorrelación medida por un rectángulo de altura 1 (máxima autocorrelación) y anchura τ , de acuerdo con la expresión [5.5]. Esto es lo que se conoce como escala integral temporal, que es una medida del tiempo sobre el cual $u(t)$ tiene una alta autocorrelación consigo misma, es decir, τ es una medida de la “memoria” del proceso. La forma de la función de autocorrelación es muy similar para todos los tests analizados (por eso solo se presentan dos gráficos). Los valores de la escala temporal de la turbulencia, obtenidos para cada uno de los tests cuya autocorrelación se calculó con 90 intervalos son los siguientes:

Test	Escala Temporal t (s)
05021149	0.0070
05031230	0.0708
05041312	-0.0005
05051634	0.0879
06031315	-0.0174
06041450	-0.0471
06051530	-0.1974
07020939	-0.0507
07031019	-0.0504
07041059	-0.0856
07051142	0.0172
07061220	0.0066
08030957	0.0765
08051120	0.0916
08081547	0.0483
09010832	0.0033

Tabla 5.8.- Escala temporal (τ) de la turbulencia para los tests analizados.

Como puede observarse de la tabla 5.8, los valores obtenidos por la escala temporal de la turbulencia varían entre los 0.0005 segundos del test 05041312 y los 0.1974 del test 06051530. Estos valores son consistentes con las predicciones teóricas que sugieren valores de la escala temporal de la turbulencia entre 10^{-1} s y 10^{-3} s.

5.3.6.2.- Escala espacial de la turbulencia

De manera similar a la definición de la escala temporal de la turbulencia, en la que se establece una función de autocorrelación, es posible definir una autocorrelación en función de la separación espacial entre medidas de la misma variable en dos puntos distintos. Considerando $u(x_0, t)$ y $u(x_0+x, t)$ denotan las medidas de la variable u en los puntos x_0 y x_0+x , entonces la correlación espacial se define como $\langle u(x_0, t) u(x_0+x, t) \rangle$.

Si el campo es homogéneo espacialmente², entonces la estadística es independiente de la localización x_0 , de manera que la correlación normalizada depende exclusivamente de la separación x :

$$R(x) = \frac{\langle u(x_0, t) u(x_0+x, t) \rangle}{u'^2} \quad [5.7]$$

De aquí que se necesiten medidas instantáneas de $u(x)$ como una función de la posición para calcular las correlaciones espaciales $R(x)$.

La escala espacial de la turbulencia L representa la distancia transversal al flujo medio a la cual el *momentum* es transportado por los vórtices turbulentos. Para determinar esta escala se puede aplicar cualquiera de los siguientes 3 métodos:

i. Mediante la definición clásica:

$$L = \int_0^\infty R(l) dl = \int_0^\infty \frac{u'(l) u'(0)}{u'^2} \quad [5.8]$$

donde $u' = \sqrt{u'^2 + v'^2}$. En la práctica, el límite superior se sustituye por la distancia máxima (L_{max}) entre los correntímetros, por lo que los valores de los intervalos espaciales (dl) son fijos y se corresponden con las distancias de separación verticales

² De forma similar a la autocorrelación, en la correlación entre dos series de la misma variable, el origen de la serie se cambia por x_0 y la función de correlación entre dos series $R(x) = \langle u(x_0, t) u(x_0+x, t) \rangle$ se redefine como $\langle u(0) u(x_0+x) \rangle = \langle u(0) u(\ell) \rangle$, donde $\ell = (x_0+x)$ es la distancia entre los dos puntos en el espacio para correlacionar las series de la variable u .

entre los sensores. Las distancias L_{max} correspondientes a estos experimentos se resumen en la tabla 5.9

Test	Distancia al fondo	Intervalo espacial (cm)
1	5	95
2	10	95
3	25	75
4	65	35
5	100	0

Tabla 5.9.- Intervalos espaciales utilizados para los tests analizados.

Utilizando $L_{max} = 100$ cm, se han obtenido las escalas espaciales para los tests en estudio, que se muestran en la tabla 5.10.

Test	Escala Espacial L (cm)
05021149	1.1
05031230	1.6
05041312	1.3
05051634	0.7
06031315	0.7
06041450	0.9
06051530	1.1
07020939	1.4
07031019	0.8
07041059	1.2
07051142	1.1
07061220	1.3
08030957	1.2
08051120	1.5
08081547	0.7
09010832	0.7

Tabla 5.10.- Escala espacial (L) de la turbulencia para los tests analizados.

ii. Mediante la relación con la profundidad, altura de ola y velocidades orbitales:

$$\frac{L}{h} = \alpha_1 + \alpha_2 \frac{H_{rms}}{h} + \alpha_3 \frac{u_{orb}}{c} \quad [5.9]$$

donde h = calado, u_{orb} = velocidad orbital del oleaje, c = celeridad de fase y H_{rms} = altura de ola media cuadrática (obtenida estadísticamente a partir de las series de altura de ola medidas con el sensor de alturas de ola).

Los valores empíricos de α_1 , α_2 , α_3 , utilizados son los propuestos por Rodríguez *et al.* (1999) para la rotura tipo *spilling* ($\alpha_1 = 0.286$, $\alpha_2 = -0.837$ y $\alpha_3 = 2.820$).

El calado es el correspondiente a cada uno de los tests (determinado a partir también del sensor de oleaje, sumando 4 cm al valor medio de la serie de alturas, que es la distancia del sensor al fondo). Así los resultados obtenidos para los distintos tests se resumen en la tabla 5.11.

Comparando estos resultados con los de Rodríguez *et al.* (1999), se observa que los valores de L/h fueron superiores en la campaña del 93, que oscilaron entre 0.24 y 0.58, mientras que en el análisis de los tests de la campaña del 96, los valores varían entre 0.10 y 0.17. Estos resultados se pueden explicar en el hecho de que las condiciones energéticas durante la campaña Delta'96 fueron mucho m'as suaves que las que se presentaron durante la campaña Delta'93.

Test	H_{rms} (cm)	h (cm)	u_{orb} (cm/s)	c (cm/s)	L/h	Escala Espacial L (cm)
05021149	22.5	75.7	10.0	272.6	0.14	10.6
05031230	22.6	82.6	4.3	284.6	0.10	8.2
05041312	19.6	75.8	8.3	272.8	0.15	11.7
05051634	11.7	142.7	0.6	374.2	0.22	31.7
06031315	21.1	84.2	4.1	287.5	0.11	9.8
06041450	24.1	71.1	14.3	264.1	0.15	11.0
06051530	21.4	76.9	5.4	274.8	0.10	8.3
07020939	25.7	72.8	13.1	267.2	0.13	9.4
07031019	24.9	56.1	17.5	234.5	0.12	6.9
07041059	19.5	73.7	4.4	268.9	0.11	8.2
07051142	17.6	70.6	9.0	263.2	0.17	12.2
07061220	18.8	55.9	14.1	234.2	0.17	9.8
08030957	22.8	89.3	3.7	295.9	0.10	9.6
08051120	20.7	65.8	11.4	254.1	0.15	10.2
08081547	15.5	172.1	4.9	410.9	0.24	42.0
09010832	24.7	71.8	13.3	266.2	0.13	10.0

Tabla 5.11.- Escala espacial (L) de la turbulencia y otras escalas espaciales para los tests analizados.

iii. Mediante la relación con la celeridad de fase y la escala temporal de la turbulencia:

$$L = c \tau \quad [5.10]$$

Aceptando que esta relación se cumple, los resultados de la escala espacial de la turbulencia se presentan en la tabla 5.12.

Test	Escala Temporal t (s)	c (cm/s)	Escala Espacial L (cm)
05021149	0.0070	272.6	1.91
05031230	0.0708	284.6	20.15
05041312	-0.0005	272.8	0.14
05051634	0.0879	374.2	32.89
06031315	-0.0174	287.5	5.00
06041450	-0.0471	264.1	12.44
06051530	-0.1974	274.8	54.25
07020939	-0.0507	267.2	13.55
07031019	-0.0504	234.5	11.82
07041059	-0.0856	268.9	23.02
07051142	0.0172	263.2	4.53
07061220	0.0066	234.2	1.55
08030957	0.0765	295.9	22.64
08051120	0.0916	254.1	23.28
08081547	0.0483	410.9	19.85
09010832	0.0033	266.2	0.88

Tabla 5.12.- Escala espacial (L) de la turbulencia obtenida a partir de la escala temporal (τ) y la celeridad del oleaje.

De este análisis de la escala espacial de la turbulencia L , se destaca que los obtenidos con el primer método se basan completamente en datos experimentales medidos de las series de velocidades de los correntímetros y los valores son muy uniformes y son del orden de 1 cm. Como inconveniente de éste método se puede destacar el hecho de que el correntímetro de “partida” para la integración espacial no siempre se encontraba en las proximidades de la superficie libre, que es donde se espera la mayor energía turbulenta. El segundo método se basa en una expresión basada en el trabajo de Rodríguez *et al.* (1999) en su análisis de la campaña Delta’93 (cuyas condiciones energéticas eran mayores que en la campaña Delta’96). Los valores que se obtienen con este método son un orden de magnitud mayores que los hallados con el primer método. Esto es esperable, ya que los coeficientes constantes de la ecuación [5.9] se obtuvieron con un oleaje sensiblemente mayor. Por último, el tercer método, que hace uso de la escala temporal de la turbulencia para estimar la escala espacial, tiene el inconveniente de las incertidumbres propias de la determinación de la escala espacial (particularmente las relacionadas con el límite superior de integración temporal). Por lo tanto, los valores de L , “acarrear” las incertidumbres y errores asociados a la obtención de la escala temporal τ .

Otro aspecto a destacar de los resultados obtenidos (tabla 5.12) con el tercer método, es que son bastante heterogéneos, como ocurre también con los dos anteriores.

Comparando estos métodos, parece ser que el más válido de los tres es el primero, ya que es el que da los resultados más homogéneos y se basa en la teoría específica para la obtención de L .

5.3.6.3.- Comparación de resultados

Flick & George (1990) llevaron a cabo experimentos en las playas californianas de La Jolla, donde midieron las fluctuaciones turbulentas en la zona de rompientes y en la zona de swash mediante anemómetros de placa caliente a 20 y 38 cm del fondo. Los resultados que encontraron para la escala espacial de la turbulencia L , son del orden de la altura de ola. Mas tarde, George *et al.*, (1994) sugieren un valor aproximado de $L \approx \frac{1}{4}h$, donde h es el calado.

Comparando los valores propuestos por estos investigadores (obtenidos a partir del primer método), se observa que, en cualquier caso, los resultados son mucho mayores que los obtenidos para la campaña Delta'96, donde las condiciones energéticas eran mucho más débiles que las registradas en las playas del Pacífico. En la tabla 5.13 se presentan los valores para L sugeridos por distintos autores.

L	Estudio	Referencia
$0.2 - 0.3 h$	Laboratorio (zona de rompientes)	Svendsen, 1987
H_{rms}	-----	McKee Smith <i>et al.</i> , 1993
$0.43 h$	Campo (zona de swash)	Flick & George, 1990
$0.25 h$	Campo (zona de rompientes)	George <i>et al.</i> , 1994
$0.04 h$	Laboratorio (zona de rompientes exterior)	Cox <i>et al.</i> , 1994
$0.12 h$	Laboratorio (zona de rompientes media)	Cox <i>et al.</i> , 1994
$0.18 h$	Laboratorio (zona de rompientes interior)	Cox <i>et al.</i> , 1994

Tabla 5.13.- Valores adoptados para la escala espacial de la turbulencia L en la bibliografía (Rodríguez, 1997).

5.3.7.- Intensidades Macroturbulentas

A continuación se analiza la estructura vertical de las velocidades horizontales (u' y v') turbulentas medidas. La componente vertical (w') queda fuera de este análisis, ya que solo se tienen medidas en el correntímetro a 65 cm del fondo.

La estructura típica de las intensidades turbulentas adimensionalizadas (figuras 5.26, 5.27 y 5.28), tal como era de esperar, presenta valores muy bajos y prácticamente constantes por debajo del primer tercio de la columna del agua, siendo mas evidente cerca del fondo, mientras que por encima del mismo es mayor, debido a la rotura del oleaje, tal como se puede observar del análisis de 3 diferentes tests (05051634, 07061220 y 08081547).

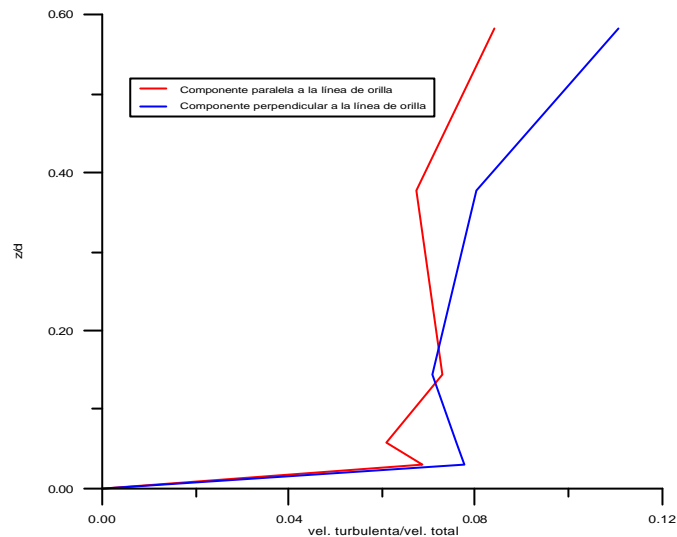


Figura 5.26.- Intensidades turbulentas. Test 05051634.

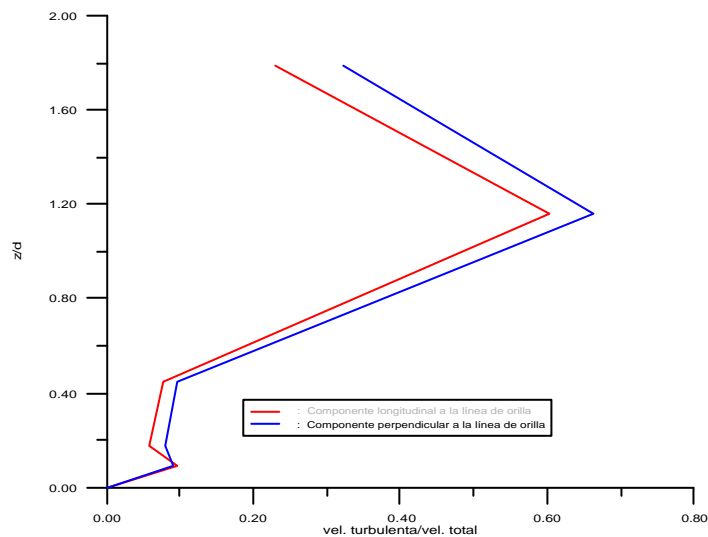


Figura 5.27.- Intensidades turbulentas. Test 07061220.

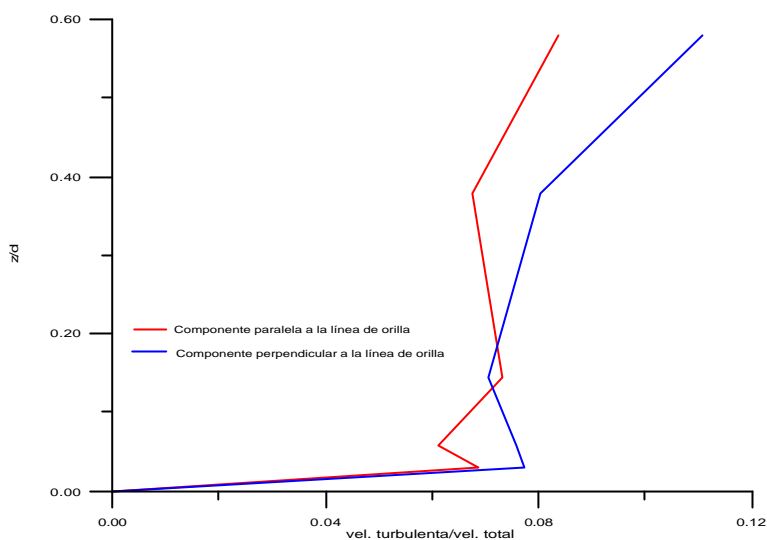


Figura 5.28.- Intensidades turbulentas. Test 08081547.

El test 05051634 se realizó a una profundidad aproximada de 142 cm, por lo que el valor registrado en el correntímetro 6 (a 100 cm del fondo) queda en el tercio superior de la columna del agua. En la figura 5.26 se puede observar que los valores de u'/u_{total} son prácticamente constantes y cercanos a 0.07 para profundidades (z) pequeñas, aumentando en las cercanías de la superficie.

En el test 07061220, el calado era de 55 cm, por lo que fue inferior a la altura de los correntímetros 6 (100 cm) y 5 (65 cm). Por lo tanto, estos correntímetros (expuestos al aire la mayor parte del tiempo) obtenían velocidades nulas. Esto provoca que la parte superior de la curva u'/u_{total} vs. z/d adquiera un sentido decreciente, debido a que los registros de velocidades de los correntímetros 5 y 6 están “falseados” al añadir ceros cuando los correntímetros no estaban en contacto con el agua.

En el test 08081547 el valor del calado era de 172.1 cm, es decir, ampliamente superior a la distancia al fondo del correntímetro superior (el número 6). Debido a que los valores de z/d son relativamente bajos, los valores observados de u'/u_{total} se mantienen prácticamente constantes y cercanos a 0.07 (esperable para z/d bajos).

Por otra parte, también se observa que los valores de ambas componentes de la velocidad (la longitudinal a la costa u' y la perpendicular a la costa v'), son bastante similares, con valores algo superiores para la componente perpendicular.

5.3.8.- Energía cinética turbulenta

La medida de la energía cinética turbulenta (ecuación [5.11]) en la zona de rompientes (correcta medición de las fluctuaciones turbulentas y sus respectivas correlaciones dentro del fluido) no es una tarea fácil de realizar.

$$K(z) = \frac{1}{2}(u'^2 + v'^2 + w'^2) \quad [5.11]$$

Algunos de los aparatos más precisos para medir fluctuaciones de alta frecuencia, como medidas con láser o correntímetros Doppler de alta precisión, tienen serias limitaciones en regiones de mezcla entre aire y agua, donde tienen lugar los fenómenos turbulentos más importantes en una playa.

Otra limitación importante en las medidas de la energía cinética turbulenta es que algunos dispositivos son 2D, por lo que las propiedades tridimensionales del fluido deben ser inferidas a partir de la información bidimensional obtenida con estos dispositivos. Este hecho hace que tenga particular importancia la caracterización del fluido a partir de algunas de sus propiedades turbulentas. Por ejemplo, conociendo de forma aproximada la fracción de energía cinética correspondiente a cada eje coordenado, es posible establecer el grado de isotropía del movimiento turbulento y así estimar K_{total} en función de las medidas obtenidas de K_m (energía cinética bidimensional). La energía cinética turbulenta (ecuación [5.11]) se puede obtener a partir de 3 métodos diferentes:

i. Primer método:

Conociendo la fracción aproximada de energía cinética correspondiente a cada eje coordenado, es posible determinar el grado de isotropía del movimiento turbulento y así estimar K_{total} (ecuación [5.12]) en función de las medidas obtenidas de K_m (energía cinética bidimensional) (ecuación [5.13]):

$$K_{\text{total}} = \frac{1}{2}(\langle u'^2 \rangle + \langle v'^2 \rangle + \langle w'^2 \rangle) \quad [5.12]$$

$$K_{m_u} = \frac{1}{2}(\langle u'^2 \rangle + \langle w'^2 \rangle) \quad \text{o} \quad K_{m_v} = \frac{1}{2}(\langle v'^2 \rangle + \langle w'^2 \rangle) \quad [5.13]$$

donde $\langle \rangle$ es el operador de promediado. De acuerdo con Townsend (1976) y Stive & Wind (1986), para condiciones de laboratorio es posible adoptar los siguientes valores (con los cuales, suele obtenerse un error cercano al $\pm 10\%$):

$$\frac{\langle u'^2 \rangle}{2K_{m_v}} = 0.43, \quad \frac{\langle v'^2 \rangle}{2K_{m_u}} = 0.32, \quad \frac{\langle w'^2 \rangle}{2K_{m_{u,v}}} = 0.26 \quad [5.14]$$

De acuerdo con esto, con las velocidades registradas en el correntímetro 4 (componentes $-v$, w), es posible obtener un valor para $K_{m_v} = \frac{1}{2}(\langle v'^2 \rangle + \langle w'^2 \rangle)$ y de aquí, un valor para $K_{total} = 1.72K_{m_v}$. La tabla 5.14 muestra la energía cinética obtenida en cada uno de los tests realizados durante la campaña Delta 96.

Test	$\langle v'^2 \rangle \left[\frac{cm^2}{s^2} \right]$	$\langle w'^2 \rangle \left[\frac{cm^2}{s^2} \right]$	$K_{m_v} \left[\frac{cm^2}{s^2} \right]$	$K \left[\frac{cm^2}{s^2} \right]$
05021149	213.4	168.0	190.7	328.1
05031230	22.9	28.1	25.5	43.8
05041312	88.3	69.7	79.0	135.9
05051634	0.4	0.4	0.4	0.7
06031315	28.7	27.1	27.9	48.1
06041450	320.2	217.7	269.0	462.7
06051530	62.1	62.0	62.1	106.8
07020939	170.3	158.1	164.2	282.5
07031019	429.9	467.0	448.5	771.4
07041059	20.4	21.0	20.7	35.7
07051142	92.6	69.4	81.1	139.4
07061220	300.1	357.7	328.9	565.7
08030957	28.9	24.8	26.8	46.2
08051120	366.2	440.1	403.2	693.5
08081547	31.1	33.2	32.2	55.4
09010832	34.8	33.6	34.3	58.9

Tabla 5.14.- Energía cinética obtenida a partir de las componentes bidimensionales medidas durante los tests de la campaña Delta'96.

Otra forma alternativa para obtener la energía cinética turbulenta (de acuerdo con Rodríguez, 1997) es a partir de las relaciones entre las componentes de las velocidades turbulentas mediante la metodología propuesta por Aono y Hattori (1987) y Nadaoka (1986), que estiman los valores de la componente vertical turbulenta w' a partir de las velocidades horizontales u' y v' , según la función:

$$\frac{u'}{w'}(z) = \beta_1 + \beta_2 \frac{z}{d} + \beta_3 \frac{(x - x_b)}{L} \quad [5.15]$$

donde x = coordenada transversal a la playa, x_b = distancia transversal hasta la línea de rotura, L = longitud de onda y β_i = constantes ($i = 1, 2, 3$).

A partir de esta expresión (ecuación [5.15]) y conociendo la distancia hasta la línea de rotura (x_b) y la posición del trineo en el momento de las medidas (x), es posible ajustar estos coeficientes β_i , ya que se conoce la relación u'/w' a 65 cm del fondo (medida). Entonces es posible realizar un ajuste a partir de los resultados de diferentes tests, pudiéndose obtener una expresión similar para el caso y las condiciones de la playa del

Trabucador durante los experimentos Delta'96. Los valores de x y x_b pueden obtenerse a partir de la profundidad y la pendiente media de la playa o bien a partir de las imágenes de vídeo tomadas en Delta 96. A partir de aquí se pueden obtener unos coeficientes análogos a los propuestos por Townsend (1976) y Stive y Wind (1986):

$$C_1 = \frac{\langle u'^2 \rangle}{2K'}, \quad C_2 = \frac{\langle v'^2 \rangle}{2K'}, \quad C_3 = \frac{\langle w'^2 \rangle}{2K'} \quad [5.16]$$

Esta metodología no se desarrolla en esta tesis.

ii. Segundo método

El segundo método propuesto en esta tesis para estimar la energía cinética asociada a cada test es mediante las 3 componentes de la velocidad (y no a partir de datos en dos dimensiones como el anteriormente descrito), medidas con los correntímetros 4 (w y $-v$) y 5 (u y v).

La proximidad física y la misma altura desde el fondo de ambos correntímetros permiten suponer que la componente v será similar en ambos aparatos, de tal manera que a 65 cm del fondo es posible suponer que las velocidades fueron medidas tridimensionalmente.

A partir de aquí es posible calcular de manera directa la energía cinética turbulenta después de realizar los filtrados correspondientes (tabla 5.15).

Test	$\langle u'^2 \rangle \left[\frac{cm^2}{s^2} \right]$	$\langle v'^2 \rangle \left[\frac{cm^2}{s^2} \right]$	$\langle w'^2 \rangle \left[\frac{cm^2}{s^2} \right]$	$K \left[\frac{cm^2}{s^2} \right]$
05021149	320.2	213.4	168.1	350.9
05031230	23.2	22.9	28.1	37.1
05041312	120.8	88.3	69.7	139.4
05051634	0.4	0.4	0.4	0.6
06031315	24.3	28.7	27.2	40.1
06041450	222.9	320.2	217.8	380.5
06051530	71.0	62.2	62.0	97.6
07020939	137.7	170.3	158.1	233.1
07031019	322.1	429.9	467.1	609.5
07041059	32.2	20.5	21.1	36.9
07051142	98.6	92.6	69.4	130.3
07061220	178.8	300.1	357.7	418.3
08030957	12.8	28.9	24.8	33.3
08051120	165.7	366.3	440.1	486.1
08081547	4.6	31.2	33.3	34.5
09010832	22.9	34.9	33.7	45.7

Tabla 5.15.- Energía cinética obtenida de las medidas "tridimensionales" del trineo.

iii. Tercer método

El tercer método propuesto para encontrar la energía cinética turbulenta es estadístico, ya que, asociando una función de probabilidad normal a cada componente turbulenta se cumple que:

$$\begin{aligned}\sigma_u^2 = \overline{u'^2} \rightarrow \sigma_u &= \sqrt{\text{varianza}(u)} = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} u'^2 p(u') du'} \\ \sigma_v^2 = \overline{v'^2} \rightarrow \sigma_v &= \sqrt{\text{varianza}(v)} = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} v'^2 p(v') dv'} \\ \sigma_w^2 = \overline{w'^2} \rightarrow \sigma_w &= \sqrt{\text{varianza}(w)} = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} w'^2 p(w') dw'}\end{aligned}\quad [5.17]$$

Por lo tanto:

$$K = \frac{1}{2}(\sigma_u^2 + \sigma_v^2 + \sigma_w^2) \quad [5.18]$$

De esta manera, suponiendo que las velocidades siguen una cierta función de probabilidad, es posible encontrar los momentos asociados a dicha función. Los momentos son los siguientes:

- La media, que representa el valor esperado de la variable misma. Para una variable aleatoria, como la velocidad turbulenta u' , la media μ es el primer momento con respecto al origen; es una medida de la tendencia central de la distribución:

$$M_1 = \mu = \int_{-\infty}^{\infty} u' f(u') du' \quad [5.19]$$

- El segundo momento respecto de la media, la varianza σ^2 , mide la “variabilidad” de los datos, es decir, la dispersión de los mismos alrededor de la media:

$$M_2 = \sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (u' - \mu)^2 f(u') du' \quad [5.20]$$

- El tercer momento alrededor de la media, la asimetría o sesgo, mide la distribución de los valores de una distribución alrededor de la media:

$$M_3 = \sigma^3 = \int_{-\infty}^{\infty} (u' - \mu)^3 f(u') du' \quad [5.21]a$$

que de forma adimensional (coeficiente de asimetría) se obtiene como:

$$\text{Sesgo} = \frac{(u' - \mu)^3}{\int_{-\infty}^{\infty} (u' - \mu)^3 f(u') du'} \quad [5.21]b$$

- El cuarto momento central, la kurtosis, mide el achatamiento de la función de probabilidad:

$$M_4 = \sigma^4 = \int_{-\infty}^{\infty} (u' - \mu)^4 f(u') du' \quad [5.22]$$

que de forma adimensional se obtiene como:

$$\text{Asimetria} = \frac{(u' - \mu)^4}{\int_{-\infty}^{\infty} (u' - \mu)^4 f(u') du'} \quad [5.22]$$

Las tablas 5.16, 5.17, 5.18 y 5.19 muestran los momentos 1, 2, 3 y 4 de las componentes u' , v' , w' de las velocidades y la energía cinética obtenida respectivamente.

Test	$S_{u'}$	u'	$M_{3u'}$	$M_{4u'}$
05021149	17.8900	-0.0015	0.0072	7.9310
05031230	4.8156	-0.0006	-0.0383	16.1702
05041312	10.9897	-0.0008	0.0473	19.9277
05051634	0.6189	-0.0001	-0.0180	0.3437
06031315	4.9260	0.0042	0.5728	44.7253
06041450	14.9326	-0.0014	-0.5403	15.7460
06051530	8.4276	0.0011	0.9144	20.8226
07020939	11.7344	-0.0001	0.1601	21.2429
07031019	17.9473	-0.0032	-0.4335	11.3467
07041059	5.6740	-0.0026	0.1310	39.3328
07051142	9.9298	0.0002	0.0364	18.7310
07061220	13.3725	-0.0016	-0.4013	15.4381
08030957	3.5785	0.0002	0.7603	51.7452
08051120	19.9979	-0.0049	0.6300	7.4532
08081547	2.1414	-0.0001	10.7444	474.2061
09010832	4.7858	0.0005	0.2397	107.7168

Tabla 5.16.- Parámetros estadísticos de la componente turbulenta u' .

Test	$S_{v'}$	v'	$M_{3v'}$	$M_{4v'}$
05021149	14.6107	-0.0007	0.1362	12.0078
05031230	4.7873	-0.0006	-0.0287	11.1253
05041312	9.3983	-0.0021	-0.0900	27.1445
05051634	0.6543	-0.00001	-0.6368	17.8832
06031315	5.3595	0.0005	0.5720	30.2933
06041450	17.8963	-0.0015	0.0072	7.9310
06051530	7.8860	0.0056	0.1395	4.2388
07020939	13.0516	-0.0091	0.3515	18.7950
07031019	20.7358	-0.0022	-0.2314	8.0854
07041059	4.5267	0.0001	0.1126	4.0482
07051142	9.6248	-0.0007	0.8230	28.0031
07061220	17.3252	0.0045	-0.4449	8.8356
08030957	5.3813	0.0005	0.2439	47.8624
08051120	19.1389	-0.0010	0.0123	4.2496
08081547	5.5833	0.00003	1.8812	101.9528
09010832	5.9065	0.00003	0.5777	88.6996

Tabla 5.17.- estadísticos para la componente turbulenta v' .

Test	$S_{w'}$	w'	$M_{3w'}$	$M_{4w'}$
05021149	12.9645	0.0036	-0.0208	14.3933
05031230	5.2995	0.0002	-1.0318	26.9276
05041312	9.2119	-0.0024	-0.5899	23.5857
05051634	0.6555	0.0001	-0.0358	3.4568
06031315	5.2138	-0.0051	-0.6882	23.4723
06041450	14.7580	-0.0005	-0.4238	12.3646
06051530	7.8756	-0.0030	-0.5305	5.9869
07020939	12.5755	0.0060	0.0668	20.1935
07031019	21.6125	0.0042	0.0324	8.1150
07041059	4.5933	0.0022	-0.7752	11.6170
07051142	8.3334	-0.0004	-0.5077	25.8189
07061220	18.9139	-0.0014	0.3343	8.7663
08030957	4.9820	-0.00001	0.6201	26.1978
08051120	20.9796	0.0002	0.0747	7.6075
08081547	5.7704	0.00001	2.6987	108.7019
09010832	5.8036	-0.0007	0.0628	56.7382

Tabla 5.18.- Parámetros estadísticos para la componente turbulenta w' .

Test	$K \left[\frac{cm^2}{s^2} \right]$
05021149	350.8
05031230	37.1
05041312	146.9
05051634	0.6
06031315	40.1
06041450	380.5
06051530	97.6
07020939	233.1
07031019	609.6
07041059	36.9
07051142	130.3
07061220	418.4
08030957	33.3
08051120	603.2
08081547	34.5
09010832	45.7

Tabla 5.19.- Energía cinética calculada según métodos estadísticos.

Como se puede observar de las tablas de resultados, los métodos 2 y 3 dan lugar a resultados muy similares (y menores, en comparación con el primer método descrito), lo cual no es extraño, ya que ambos métodos se basan en operar con las 3 componentes medidas de las velocidades turbulentas y no en la estimación de la energía cinética asociada a partir de la deducción teórica de la componente vertical de las velocidades turbulentas. La energía cinética obtenida con el primer método es mayor que la obtenida en los métodos 2 y 3. La componente $\langle u'^2 \rangle$ se calculó a partir de $\langle u'^2 \rangle = (0.43)(2)(K)$,

(ecuación [5.14]) siendo $K = 1.72(\langle v'^2 \rangle + \langle w'^2 \rangle)$. Al parecer, esta ecuación da valores adecuados (de acuerdo con los resultados de los métodos *ii* y *iii*) cuando la energía cinética K tiene valores aproximados a 0.140 [cm²/s]. Para valores mayores de K , las diferencias que se obtienen entre estos métodos crecen enormemente.

Es importante recalcar que el primer método ha sido validado para condiciones de laboratorio, por lo que su aplicación para los datos de Delta'96 es sólo adecuada para valores de la energía cinética turbulenta relativamente bajos. Por otra parte, Flick & George (1990) en los experimentos llevados a cabo en las playas de La Jolla (Océano Pacífico) encontraron una cierta isotropía horizontal de la turbulencia al comparar las componentes de la intensidad horizontal, es decir, $u' \approx v'$. Analizando los datos obtenidos en las medidas de Delta'96, las componentes horizontales turbulentas presentan tendencias similares (aumento o disminución), pero no se puede afirmar que $u' \approx v'$.

5.3.9.- Disipación

La tasa de disipación de la energía cinética turbulenta ϵ , se puede calcular como:

$$\epsilon = C_d K^{3/2} L \quad [5.23]$$

donde L es la escala espacial turbulenta, K es la energía cinética y $C_d = 1.16$ (Rodi, 1984). De acuerdo con Rodríguez (1997), la disipación de la energía es mayor en el tercio superior de la columna del agua $z/d > 0.60$ (que es donde hay mayor producción de energía cinética turbulenta en la zona de rompientes, debido a la rotura del oleaje). Para analizar la disipación de la energía cinética turbulenta ϵ , se considerarán únicamente las componentes horizontales de la velocidad, los resultados del método *ii* para la obtención de la energía cinética turbulenta y la escala espacial de la turbulencia de los tests 05051634, 07061220 08081547.

Los resultados muestran que la mayor disipación de energía cinética turbulenta se produce cerca de la superficie (figura 5.29). En el caso del test 07061220, de manera similar a lo indicado en las intensidades turbulentas, al tener un calado medio de 60 cm, los correntímetros de 65 cm y 100 cm quedaron frecuentemente fuera del agua, por lo que se obtuvieron gran cantidad de valores nulos de velocidades. Por esta razón la energía cinética turbulenta decrece para valores elevados de z/d y por consiguiente, también la tasa de disipación ϵ (ecuación [5.23]).

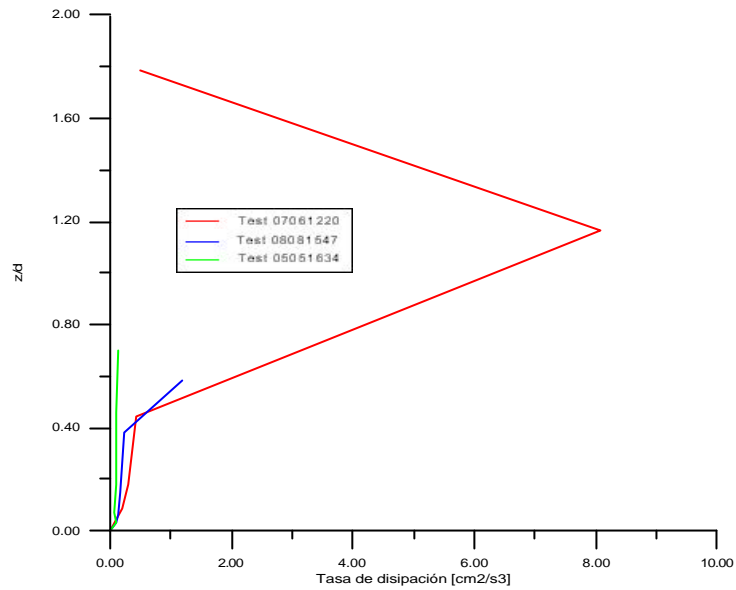


Figura 5.29.- Estructura vertical de la tasa de disipación ϵ para los tests 05051634, 07061220 y 08081547.

5.3.10.- Tensiones Macroturbulentas

Con respecto a las tensiones horizontales macroturbulentas (ecuación [5.24]), correspondientes a los tests anteriormente analizados, puede verse que éstas son mucho más importantes en la parte superior de la columna del agua (en particular para el test 08081547) -figura 5.30-, que es donde tiene lugar la mayor transferencia de *momentum* debido a la rotura.

$$\langle u'v' \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u'_i v'_i \quad [5.24]$$

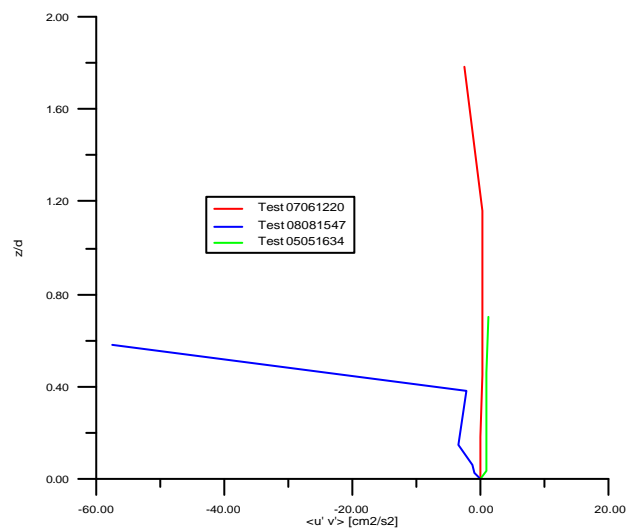


Figura 5.30.- Estructura vertical de las tensiones macroturbulentas.

Sin embargo para el caso 05051634, no se aprecia un aumento de estas tensiones en las cercanías de la superficie, probablemente debido a que las condiciones energéticas durante este test eran muy bajas, con una altura de ola significativa $H_s \approx 19$ cm con lo que el oleaje en el punto de medida ($z \approx 143$ cm) no estaba en condiciones de rotura.

En la parte inferior de la columna del agua, los valores obtenidos son prácticamente constantes y cercanos a cero en los 3 tests analizados.

5.4.- Transformación del espectro del campo de oleaje y transferencia de energía a distintas escalas hidrodinámicas en la zona cercana a la costa del Delta del Ebro

En este apartado se presentan los resultados experimentales de la transformación de la energía del oleaje (evaluada por medio del análisis espectral) en la zona cercana a la costa, en la zona de rompientes y en la zona de swash de la playa del Trabucador en el Delta del Ebro (Mösso *et al.*, 1998). Como se describió en el capítulo 2, el oleaje durante su propagación sufre una serie de procesos de deformación debidos principalmente al *shoaling* y refracción, que dan lugar a un aumento del peralte del oleaje (aumenta la altura de ola y disminuye su longitud), y posterior rotura, que provoca una disminución de la altura de ola. La energía asociada al oleaje se transforma y da lugar a distintos fenómenos físicos con distintas escalas hidrodinámicas (gradientes del tensor de radiación responsables del *setup*, *setdown* y corrientes en la zona de rompientes, producción de turbulencia, generación de ondas de borde y transporte de sedimentos principalmente).

La cantidad de energía que se transfiere a otras frecuencias (por ejemplo, a alta frecuencia en forma de turbulencia debido a la rotura o a bajas frecuencias en formas de ondas infragravitatorias o en forma de corrientes) no está totalmente comprendida ni bien descrita en el estado del arte. El análisis espectral del oleaje en el dominio de propagación permite cuantificar la transformación de energía en el dominio de las frecuencias. Por lo tanto, en este apartado se describe el estudio experimental de esta transformación y se analiza la evolución del espectro de energía cuando un tren de oleaje se propaga hacia la costa. Para poder estudiar esta transformación en la zona de swash se recurrió a la digitalización de imágenes de video (figura 5.31) tomadas durante la campaña Delta 96 (ya que solo se contaba con aparatos de medida del oleaje en la zona cercana a la costa por medio del sensor de presión y en la zona de rompientes por medio del sensor de alturas de ola). Con estas imágenes se estudiaron las oscilaciones sobre la playa, convirtiéndolas a alturas realizando una superposición con la topografía, con lo que se obtienen las mismas unidades de energía que el espectro de olas. Cabe recalcar que durante la campaña Delta'96, las condiciones presentes eran de baja energía (figura 5.32), por lo que es esperable la presencia de oscilaciones de baja energía sobre la línea de orilla. Este trabajo representa pues un primer intento de estudiar cuantitativamente la transformación de la energía en la zona cercana a la costa en la barra del Trabucador, en el Delta del Ebro.

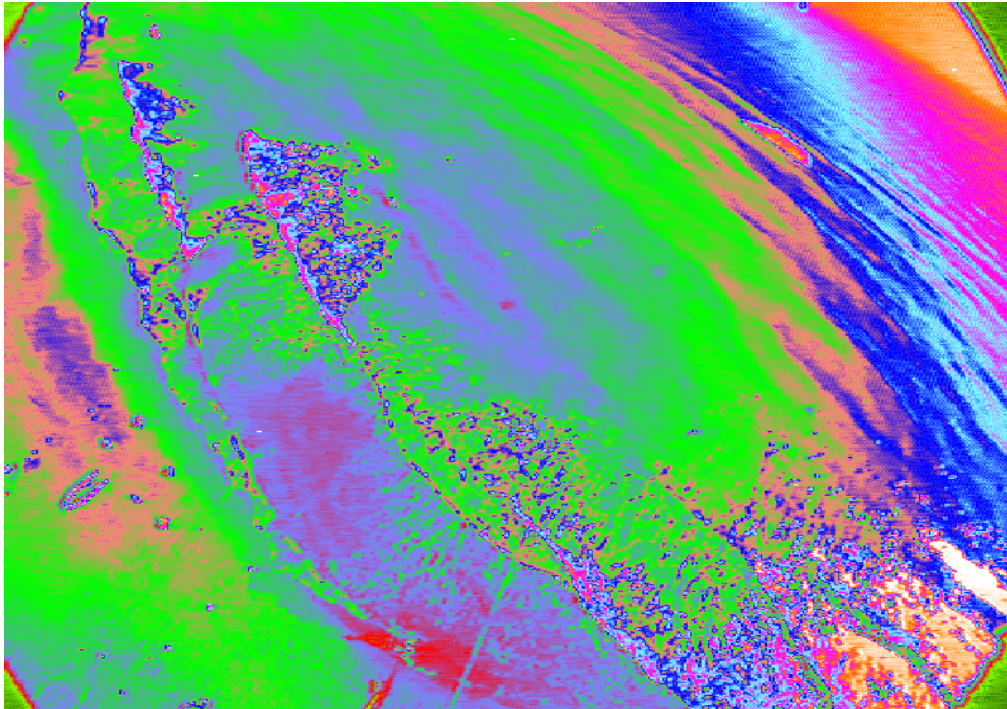


Figura 5.31.-Imagen Digitalizada de la playa del Trabucador durante la campaña Delta'96

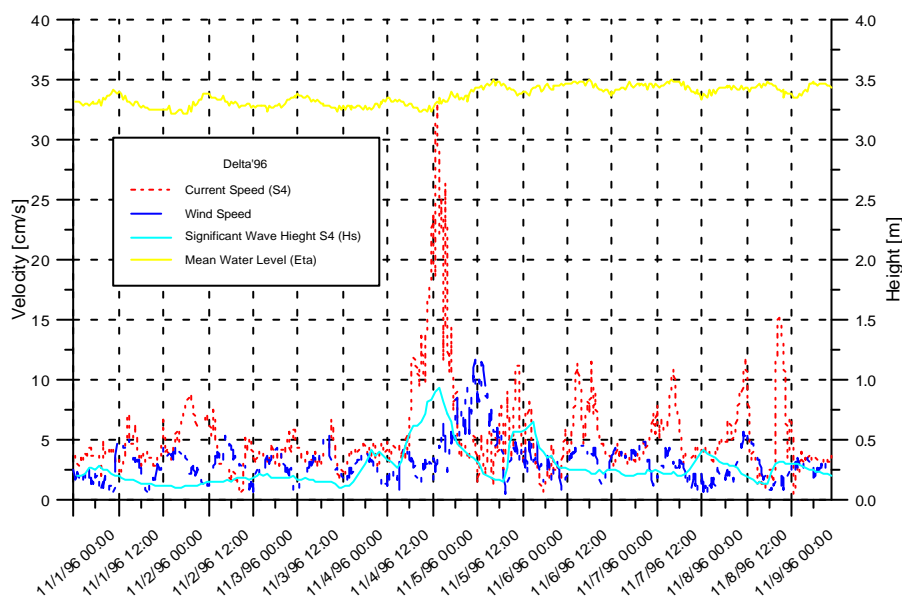


Figura 5.32.- Condiciones dinámicas predominantes durante la campaña Delta 96.

5.4.1.- Proceso de Datos

Para estimar la transformación de la energía del oleaje durante su propagación, es necesario contar con las series de tiempo de elevaciones de la superficie libre correspondientes. En el caso de la zona de rompientes, el campo de oleaje fue medido directamente con el sensor de oleaje. No obstante, en el caso de la zona cercana a la

costa, este fue medido indirectamente a través del sensor de presión. Por lo tanto, es necesario llevar la transformación de la serie de tiempo de la presión a la serie de tiempo de la variación de la superficie libre $\eta(t)$, utilizando la teoría de ondas seleccionada. Así para obtener $\eta(t)$ la serie de presión fue preprocesada, donde el primer paso fue restarle la tendencia (quitarle la media, para eliminar las variaciones debidas a las mareas) y posteriormente filtrada por medio de un filtro digital con una resolución de frecuencia de 0.008 Hz, una frecuencia mínima de 0.016 Hz (60 s) y una frecuencia máxima de 0.5 Hz (2 s). La frecuencia de corte fue determinada por medio de un análisis detallado de las series de tiempo de la presión, que mostraron que no había picos importantes en el espectro mas allá de 32 segundos, muy próximo al límite sugerido en el estado del arte para el oleaje de viento (figura 5.33). Posteriormente fue necesaria una conversión hidrodinámica, que basada en la teoría de ondas de pequeña amplitud es:

$$\eta = n \cdot \eta_p \frac{\cosh(kh)}{\cosh(k(h+z))} \quad [5.25]$$

donde η es la fluctuación de la superficie libre a partir del nivel medio del mar, η_p es la presión medida, k es el número de onda, h es la profundidad del agua y z es la profundidad donde la presión fue medida (positivo por encima del nivel del mar en reposo) y n es un factor de corrección. En este trabajo, el campo de oleaje fue obtenido por medio de dos métodos distintos, el método de Grace y el método MLFM. La precisión de ambos métodos se discute mas adelante.

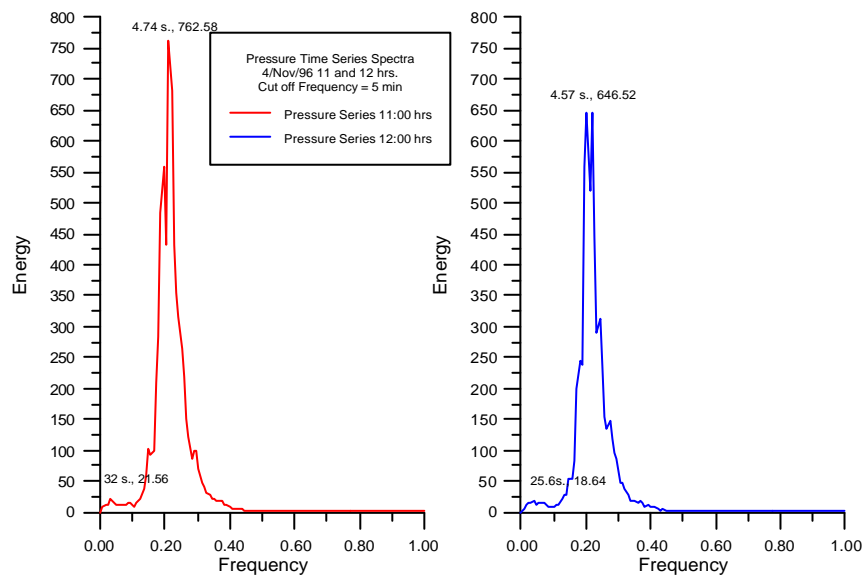


Figura 5.33.- Espectro de energía de la serie de presión medido a las 11 y 12 hrs (GMT) 4/Nov/96.

Hecho el análisis espectral, el siguiente paso es filtrar las series de presión dentro del rango de frecuencias de interés. Los filtros digitales representan una excelente herramienta para separar las escalas temporales (siempre que los parámetros asociados

al proceso de filtrado sean escogidos adecuadamente, en particular la frecuencia de corte y la longitud de la ventana). La frecuencia de corte puede ser escogida arbitrariamente (a partir del estado del arte) u obtenida a partir del análisis espectral de la serie.

Una vez realizado el filtrado de la serie de presión para obtener exclusivamente la aportación del oleaje (eliminando de la serie las aportaciones de las mareas astronómica y meteorológica, así como otras oscilaciones de baja frecuencia), se obtiene la serie de tiempo del oleaje por medio de dos métodos distintos, el método de Grace (descrito por Bishop & Donelan, 1987) y el método MLFM (*modified linear filter method*) propuesto por Wang *et al.* (1986). Se ha discutido mucho sobre la utilización de sensores de presión para determinar las alturas de ola, y muchas veces se han llegado a conclusiones contradictorias sobre la validez de los datos para obtener una serie de oleaje. No obstante la función de transferencia para obtener la serie de oleaje a partir de teoría lineal es adecuada para compensar los datos de presión y dar estimaciones de altura de ola fiables con una precisión de $\pm 5\%$ (Bishop & Donelan, 1987). Para ello se requiere que la relación ruido/señal sea lo menor posible, por lo que es muy deseable poder filtrar la señal en el rango de frecuencias de interés, de tal manera que se pueda realizar un análisis espectral “más limpio”. También hay que tener en cuenta que debido a la deformación del campo de oleaje, en aguas poco profundas es necesario aplicar un factor respuesta a la teoría lineal para obtener resultados más fiables.

5.4.1.1.- Método de Grace

Para obtener la altura de ola a partir de la presión medida con los sensores, se utiliza la teoría lineal, añadiendo un factor experimental N que corrige las diferencias debidas a factores no incluidos en la teoría lineal:

$$H = N \frac{H_p}{K_p} \quad [5.26]$$

donde $H_p = (p/\rho g)$ es una expresión de primer orden de la presión subsuperficial de la ola, que puede relacionarse con la altura de ola H' (no corregida) mediante la relación:

$$H' = \frac{H_p}{K_p} \quad [5.27]$$

donde K_p es un factor de respuesta de la presión, que para teoría lineal es:

$$K_p = \frac{\cosh(k(h+z))}{\cosh(kh)} \quad [5.28]$$

donde p = presión hidrostática, ρ = densidad del agua, g = gravedad, h = profundidad del agua, z = profundidad del sensor (negativo hacia profundidades mayores), k = número de onda y N = Factor experimental.

El *Shore Protection Manual* (CERC, 1984) señala que por regla general, el valor de N es de orden 1 y disminuye para olas de corto periodo ($N < 1$), mientras que aumenta para olas de mayor periodo ($N > 1$). No obstante, Bishop & Donelan (1987) señalan que numerosos autores han empleado diversos valores del factor N , mostrando una gran diferencia entre todos ellos.

5.4.1.2.- Método MLFM

Consiste en aplicar directamente sobre la serie de tiempo de la presión un filtro tipo MLFM descrito en Wang *et al.* (1986). Esto permite transformar la serie temporal directamente, aplicando una ventana del tipo:

$$H'(w) = A_0 + A_1 \cos(w) + A_2 \cos(2w) \quad [5.29]$$

donde A_0 , A_1 y A_2 son coeficientes que se obtienen minimizando la función error:

$$f(w) = H(w) - H'(w) \quad [5.30]$$

$H(w)$ es la función de transferencia lineal para pasar de presiones a alturas de ola:

$$H(w) = \frac{1}{K_p(w)} \quad [5.31]$$

donde:

$$K_p(w) = \frac{\cosh(k(h+z))}{\cosh(kh)} \quad [5.32]$$

La aplicación del filtro MLFM suaviza la función teórica $K_p(w)$, que aumenta exponencialmente hacia el infinito, al aumentar la frecuencia.

No obstante este suavizado sólo es posible dentro de unos límites de frecuencia bastante estrictos, que dependen fuertemente del calado y posición del sensor en experimento realizado³. La mejor manera de elegir correctamente la frecuencia máxima es visualizar gráficamente el filtro junto a la función $1/K_p(w)$ para ver el ajuste.

La aplicación del filtro se realiza de la siguiente manera:

- i. Si f_n es la frecuencia de Nyquist del filtro, el intervalo de tiempo será:

$$Dt = 1/(2f_n) \quad [5.33]$$

- ii. Definido (conocido) el intervalo de muestreo de la serie de tiempo, es inmediato calcular el índice n de la serie de presiones pn :

$$p'n = A_0pn + 0.5((pn+1) + (pn-1)) + 0.5((pn+2) + (pn-2)) \quad [5.34]$$

- iii. Aplicando este método a todos los datos de la serie se reproduce una serie con el mismo Dt que la original.

A los primeros datos (los que hay en $2Dt$ segundos) y los últimos (del mismo periodo de tiempo) sólo se aplica el término A_0 y el A_1 a partir de Dt , por lo que la serie al principio y al final no está corregida completamente.

Ambos métodos para obtener la serie de oleaje a partir de la serie de presión fueron probados en condiciones controladas en el canal de oleaje CIEM del Laboratori d'Enginyeria Marítima. En dichos experimentos se colocaron una serie de sensores de presión y sensores de oleaje a lo largo del canal, algunos de ellos en la misma posición, permitiendo la comparación directa entre el campo de oleaje medido y la serie de presión asociada. Una vez validada esta metodología, se aplicó la transformación del campo de presión medido por el S4DW durante la campaña Delta'96. Cabe destacar que la obtención del campo de oleaje a partir de ambos métodos es bastante buena, aunque el método de Grace da mejores resultados que el método MLFM, puesto que éste último es más sensible a cualquier "cambio de sentido" en las oscilaciones de la superficie libre (ver figura 5.34), dando en algunos casos, pequeñas olas donde no las había. El resultado de esto es que el espectro del campo de oleaje obtenido a partir del método MLFM (figura 5.35) presenta algunos picos de energía en la región de las altas

³ Por ejemplo para un calado de tres metros, con el sensor situado medio metro debajo del nivel medio, no es posible aplicar el método más allá de 0.5 Hz lo que da un intervalo de muestreo de 1 segundo. Esto no quiere decir que no se pueda aplicar el filtro a series de tiempo cuya frecuencia de muestreo sea superior a 1 Hz, ya que el filtro se puede aplicar a los datos en los intervalos de tiempo adecuados, pero si quiere decir que no reproducirá correctamente las variaciones de frecuencias superiores, cosa que por otra parte es de esperar, ya que eso es lo que viene a decir la tendencia exponencial del coeficiente K_p .

frecuencias (es decir, sobreestimando la energía del oleaje), mientras que el espectro del oleaje obtenido por el método de Grace no (figura 5.36).

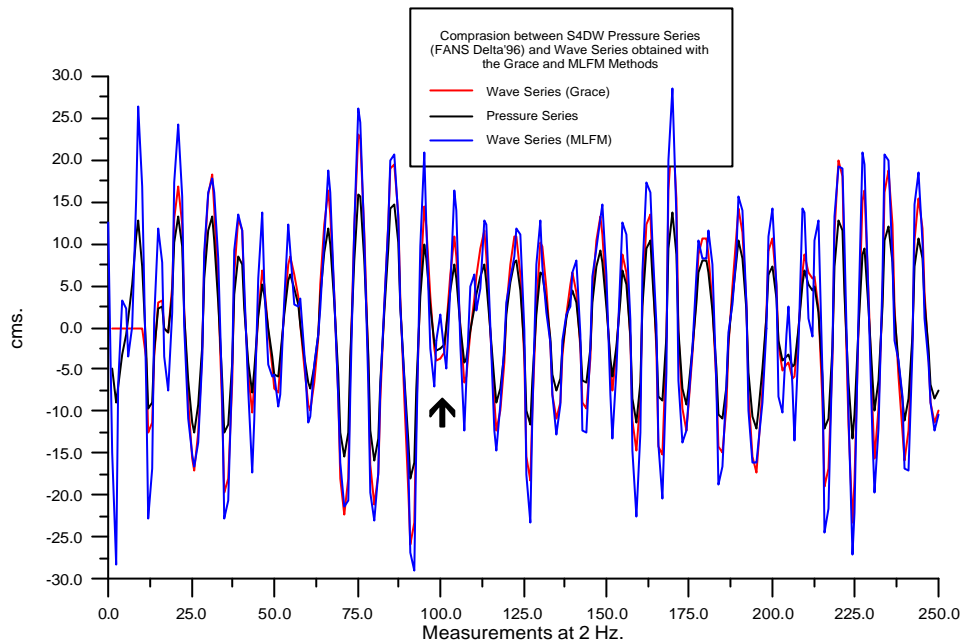


Figura 5.34.- Campo de oleaje obtenido a partir de la transformación del campo de presiones medido por el S4DW en la zona cercana a la costa por medio de los métodos MLFM y Grace.

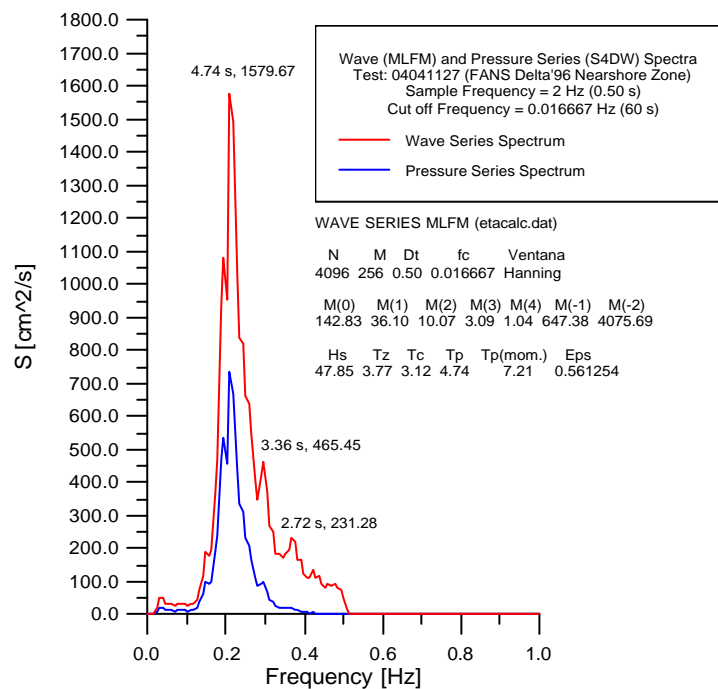


Figura 5.35.- Espectro del campo de oleaje en la zona cercana a la costa (correspondiente al test 04041127 en la zona de rompientes) obtenido por el método MLFM.

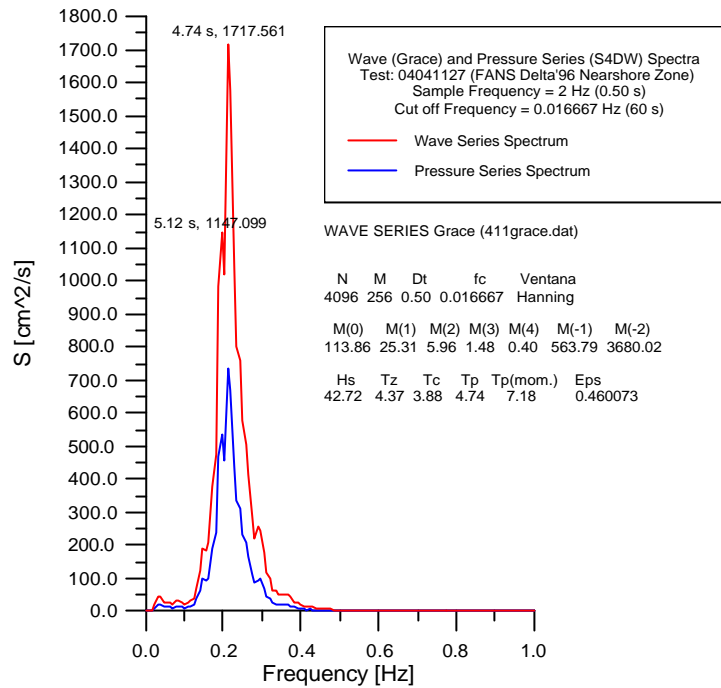


Figura 5.36.- Espectro del campo de oleaje en la zona cercana a la costa (correspondiente al test 04041127 en la zona de rompientes) obtenido por el método Grace.

5.4.2.- Análisis espectral del oleaje en la zona de rompientes

Por otra parte, el espectro del oleaje medido en la zona de rompientes con el sensor de oleaje (adosado al trineo), que se registró al mismo tiempo que las series temporales de presión mostradas (figuras 5.34, 5.35 y 5.36), se presenta en la figura 5.37.

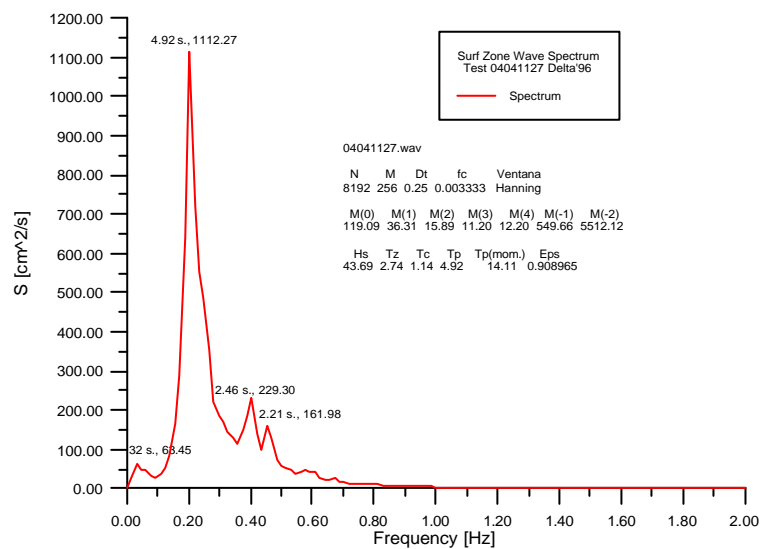


Figura 5.37.- Espectro de energía del oleaje medido en la zona de rompientes durante el test 4 del 4 de noviembre de 1996 en la campaña Delta'96.

Con las imágenes (figura 5.31) tomadas desde la grúa de 40 m de altura (Rodríguez *et al.*, 1997; Sánchez-Arcilla *et al.*, 1997), es posible observar todo el campo de oleaje en el dominio estudiado (zona cercana a la costa y zona de rompientes, donde se localizaban el S4DW y el Trineo, respectivamente). Estas imágenes permiten estudiar distintas características del oleaje y la evolución que sufren éstas a medida que se acercan a la orilla. Entre las características más destacadas que se pueden estudiar mediante las imágenes figuran la dirección de las crestas, su rotura, línea de orilla, dispersión frecuencial y energía. Esto representa una ventaja considerable en el estudio de la transformación del oleaje, pues, a diferencia de los métodos “convencionales” (e.g. los dispositivos Eulerianos como los correntímetros en el trineo o el correntímetro S4DW en el tetrápodo, o los métodos de medida Lagrangianos, como las boyas y/o trazadores), utilizando técnicas de digitalización de imágenes (Mösso *et al.*, 1997; Diez *et al.*, 1998), es posible estudiar la transformación del oleaje en todo el dominio observado.

El estudio del oleaje con estas técnicas se basan en la suposición de que, bajo ciertas circunstancias (climáticas, de iluminación solar y que no haya alternancia de sombras y claros nubosos durante la filmación), la geometría característica del oleaje provoca que en cada punto (píxel) de la imagen, los rayos de luz se reflejen con una intensidad luminosa distinta en cada punto, de modo que en la cresta hay mayor intensidad pues hay mas reflexión que en los senos. De aquí se puede suponer fácilmente la existencia de una relación lineal entre la luminosidad observada y la pendiente local de la superficie libre. La imagen resultante puede luego ser procesada realizando series temporales de una sección de las imágenes (Mösso *et al.*, 1998a,c) y analizada mediante la transformada de Fourier para obtener el espectro de luminosidad (y por consiguiente de los cambios de la pendiente de la superficie libre debidos al oleaje). Los resultados del análisis frecuencial obtenidos a partir de las medidas *in situ* y las imágenes presentan un gran parecido, por lo que es razonable suponer que se puede obtener la transformación de luminosidad a alturas de ola. El espectro de la luminosidad se transforma en espectro de alturas de ola (energía) calibrando las intensidades en el mismo punto de la imagen donde se encontraba el trineo midiendo directamente las alturas de ola. La transformación lineal entre la luminosidad y las alturas es directa:

$$H_i = a + bI_i \quad [5.35]$$

donde b es un factor de escala, de modo que el intervalo entre el valor máximo y mínimo sean iguales, y a es una translación entre los valores medios.

De acuerdo con Diez *et al.* (1998), esta calibración debe hacerse de forma cautelosa, y tener en cuenta que:

- Podría darse el caso de que los valores máximos y mínimos del oleaje no hayan sido registrados para la misma ola en cada tipo de medida, ya que el pico de la ola máxima se puede producir entre dos medidas.
- Por otro lado, que el sensor de elevaciones de superficie libre tiene una precisión de 5 cm.

El espectro de energía del oleaje medido y de luminosidades se puede observar en la figura 5.38.

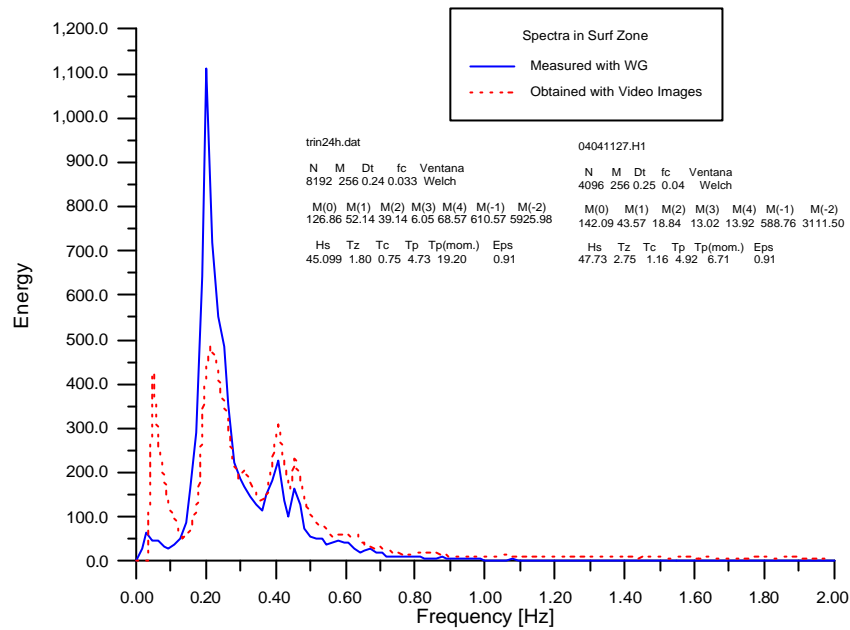


Figura 5.38.- Comparación del espectro del oleaje medido en la zona de rompientes con el sensor de oleaje y el obtenido a través de las imágenes de video.

Estos resultados sugieren la validez de la hipótesis que la relación entre las intensidades luminosas de los pixels con la pendiente de la superficie libre es lineal (ecuación [5.35]) por lo que este análisis permite realizar con fiabilidad estudios de la dispersión frecuencial del oleaje. No obstante, su aplicación directa para obtener las alturas (ola a ola) no está del todo clara, pues la intensidad responde a la reflexión correspondiente a una determinada inclinación en un punto de la ola y la relación de ésta con el nivel de superficie libre no es directa. Es decir, que las intensidades no son función del nivel de la superficie libre (η), sino que son función de la pendiente de esta, que se puede describir a partir de la forma de la onda sinusoidal periódica:

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) \quad [5.36]$$

donde k es el número de onda y ω es la fase. Derivando espacialmente la solución lineal se obtiene que:

$$\frac{\partial \eta}{\partial x} = k \frac{H}{2} \sin(kx - \omega t) = k \eta (\theta + 90) \quad [5.37]$$

De aquí se puede deducir que la intensidad depende del número de onda, por lo que para ondas largas, se puede sobreestimar dicho nivel, ya que al realizar el análisis espectral, dichos niveles se elevan al cuadrado, sobreestimando la cantidad de energía asociada a bajas frecuencias (es decir, se genera un pico desmesurado).

No obstante, la gran ventaja que tiene el vídeo en este tipo de análisis es que una vez realizada la calibración en un punto, se puede repetir para cualquier otro punto del dominio de estudio y en cualquier otro momento, siempre que las condiciones de iluminación sean parecidas. Otra ventaja es que la frecuencia de captura de las imágenes es de 0.02 segundos, mucho menor que la del sensor de altura de ola, por lo que la filmación de la zona de rompientes permite estudiar con una gran resolución temporal, los procesos que ahí tienen lugar.

5.4.3.- Análisis de la línea de orilla

Otra aplicación de las imágenes es el estudio de los procesos hidrodinámicos en la línea de orilla. No obstante, determinar su posición (que intuitivamente parece trivial) no es fácil. Para hacerlo de forma exacta hay que digitalizar puntos en la serie temporal de una sección de las imágenes y después promediar las posiciones en coordenadas reales (figura 5.39). El trabajo de digitalización se realizó de forma manual pues en ocasiones las olas llegan con espuma y en otras no, de forma que no es trivial definir el contorno. La precisión de la posición dependerá de la resolución de la digitalización. La diferencia entre la “línea” de orilla y la “línea” de rotura (calculada como la media de los puntos de rotura) define el ancho de la zona de rompientes, mientras que el ancho de los mínimos y máximos de las oscilaciones del agua a partir de la línea de orilla se considera el ancho de la zona de swash.

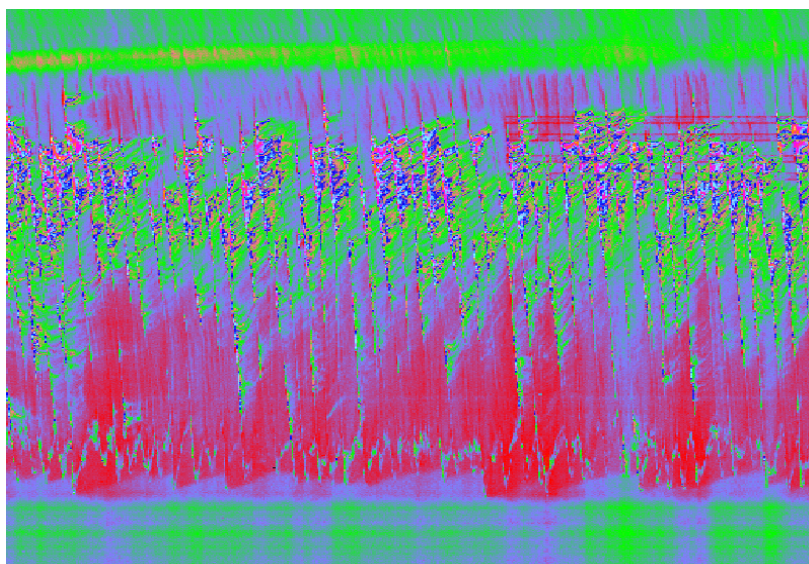


Figura 5.39.- Serie de tiempo de las oscilaciones (*setup + runup*) sobre la playa en el test 04041127. El eje horizontal = tiempo y el eje vertical = longitud de las oscilaciones sobre la playa.

Haciendo una transformación de las cotas correspondientes a las posiciones de orilla y a valores de “*setup+runup*” (restando la cota equivalente al nivel medio calculado con el sensor de presión), es decir, proyectando las oscilaciones sobre la topografía de la playa, se obtienen las alturas y se puede estimar el espectro de energía correspondiente, con las mismas unidades físicas que el campo de oleaje (figura 5.40). Estos resultados muestran picos de energía de frecuencia mas baja que no estaban presentes en los espectros del oleaje medidos en la zona cercana a la costa y en la zona de rompientes.

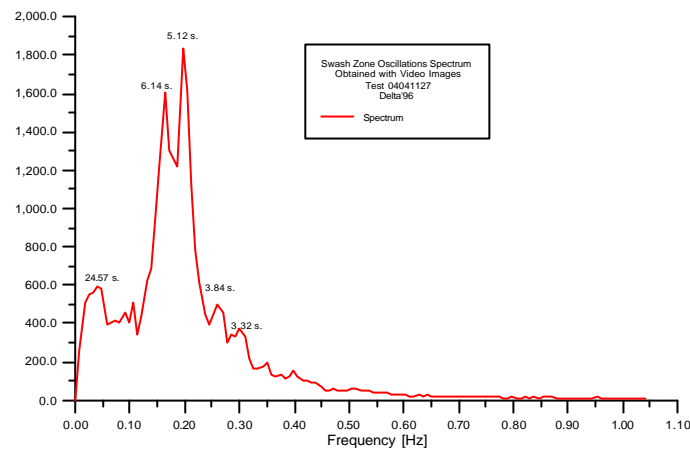


Figura 5.40.- Análisis espectral para las oscilaciones debidas al *setup + runup* sobre la playa, correspondiente al test 04041127.

La cuantificación de la transformación de la energía del oleaje en todo el dominio ha sido posible realizarla con los datos de la campaña Delta'96 por la simultaneidad de medidas hidrodinámicas, topográficas y de vídeo. Con este tipo de análisis es posible identificar las oscilaciones de baja frecuencia presentes en la línea de orilla, que pueden dar lugar a ondas largas y corrientes de retorno. El espectro de las oscilaciones sobre la playa correspondiente al día 9 de Noviembre con una aportación de energía importante en el rango de bajas frecuencias se puede ver en la figura 5.41. Ese día se observó una corriente de retorno bajo condiciones hidrodinámicas de baja energía (que se discutirá mas adelante).

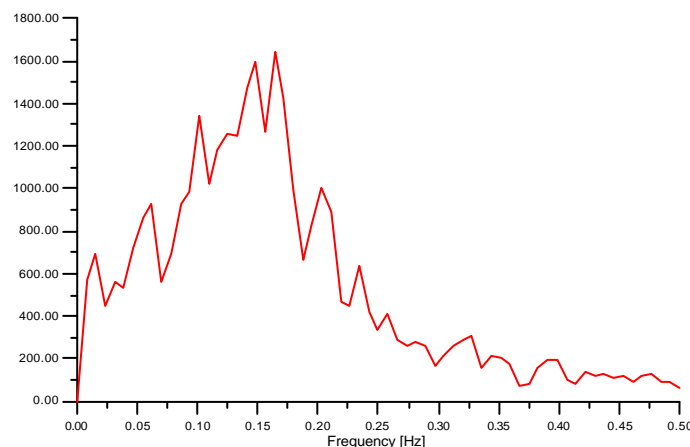


Figura 5.41.- Espectro de las oscilaciones del *setup + runup* el día 9 de noviembre.

5.4.4.- Transferencia de energía a distintas escalas hidrodinámicas

Como se ha mencionado en puntos anteriores, el viento transfiere cantidades importantes de energía a la superficie del mar en forma de oleaje, que durante su propagación hacia la costa, sufre una serie de transformaciones que terminan provocando que el oleaje rompa. Al hacerlo, la mayor parte de su energía se disipa y transfiere a otros fenómenos con escalas hidrodinámicas distintas (turbulencia, corrientes, ondas largas), y genera transporte de sedimentos y evolución costera. Este proceso de generación – propagación – rotura es un mecanismo natural en el cual se transfiere una cantidad enorme de energía a la costa. Por lo tanto, el objetivo principal de este apartado consiste en cuantificar la distribución de la energía del oleaje desde el rango de frecuencias turbulentas hasta el rango de frecuencias de las ondas infragravatorias existentes en la zona cercana a la costa y su potencial impacto en la morfología litoral. Para ello se utilizarán los datos de la campaña Delta'96, separando las escalas hidrodinámicas y cuantificando con detalle el nivel energético de cada una de las escalas consideradas.

5.4.4.1.- Análisis de las series temporales de altura de ola

El proceso de datos es de nuevo el análisis espectral, solo que esta vez se ha realizado con mayor detalle en los rangos de frecuencias de interés.

El análisis de los datos disponibles de las alturas de ola son los correspondientes a los días 5 al 9 de noviembre de 1996 (tests con datos de alturas de ola y corrientes). Se trata de un total de 29 series de 30 minutos de duración y una frecuencia de muestreo de 4 Hz, totalizando 7200 datos por serie. La metodología del proceso de datos fue la siguiente:

- Separación de los registros mediante filtro digital y remuestreo de la serie para aumentar la resolución espectral en el rango de frecuencias de interés: bajas frecuencias, flujo oscilatorio y turbulencia.
- “Rellenado” de la serie. El análisis espectral se basa en la aplicación de la transformada rápida de Fourier (FFT), que analiza series de datos de longitud 2^n . Ya que la serie de alturas de ola consta de 7200 datos, la aplicación de la FFT a dicha serie supondría utilizar únicamente 4096 datos, equivalentes a 17 minutos de medidas (dejando fuera del análisis el 43% de la serie). Por lo tanto, se procedió a eliminar la tendencia y rellenar con “ceros” la serie hasta obtener 8192 (2^{13}) datos. Al hacer esto, se puede hacer el análisis espectral sobre toda la serie sin meter ruido, ya que no se añade “energía” artificial (fluctuaciones sobre la media) a la serie.
- Análisis espectral de las 4 series (la serie total original y las 3 series resultantes de aplicar el filtro).

- Cálculo de la aportación porcentual y absoluta de cada escala hidrodinámica al total de la energía cuantificada en la serie original.

5.4.4.1.1.- Filtrado de las series de altura de ola

Las series originales de alturas de ola se filtraron, de acuerdo con los límites establecidos para cada escala hidrodinámica considerada.

Los límites entre estas escalas no son valores fijos, pero se acepta que en el Mediterráneo, el periodo del oleaje no es superior a 20 segundos (0.05 Hz), por lo que, periodos mayores de 20 segundos pueden considerarse como ondas de baja frecuencia. En el extremo inferior (del orden de 1 segundo) se tienen los límites para separar la macroturbulencia del flujo oscilatorio (tabla 5.5). Para los 13 tests restantes en la tabla anterior, se ha tomado como frecuencia de corte para la macroturbulencia el valor de 1Hz.

Una vez establecidos los límites, el siguiente paso es aplicar el filtrado digital (bandfilt). Sin embargo, este filtro es muy “sensible” a la longitud de la ventana de análisis, por lo que se realizó un estudio de sensibilidad del resultado del filtro en función del tamaño de la ventana. La longitud de estas puede ser 63, 127, 255, 511 y 1023 datos.

Aplicando ventanas de longitud 63, 127 y 1023, las frecuencias máximas establecidas por el filtro eran menores a 20 segundos. Solo las ventanas de 255 y 511 datos permitieron filtrar por encima de los 20 segundos, aunque se escogió la longitud de 511 datos porque la resolución del filtro era mayor para este caso.

5.4.4.1.2.- Análisis espectral de las series de altura de ola

Las series de tiempo resultantes del filtro digital fueron posteriormente analizadas espectralmente, obteniendo la función de densidad espectral y la cantidad de energía asociada, tanto a la serie original como a las series correspondientes a cada una de las escalas hidrodinámicas consideradas.

De manera similar al filtrado digital, el análisis espectral basa su procesado de la serie en ventanas de una cierta longitud de datos. Este parámetro establece la relación entre la precisión de los cálculos y la resolución espectral (suavizado de la función de densidad espectral). A mayor número de datos por grupo se consigue mayor precisión de cálculo pero menor resolución y viceversa. El valor óptimo considerado después de realizar análisis de las series con distintas ventanas, es el de 256 datos por ventana.

En el caso de las bajas frecuencias, se ha requerido un tratamiento diferente. Dado que una longitud de serie de 30 minutos y una frecuencia de muestreo de 4 Hz no son las

características idóneas⁴ para la medición de oscilaciones de baja frecuencia, es necesario remuestrear la serie tomando 1 de cada 20 datos, esto es, 1 dato cada 5 segundos para aumentar artificialmente el Δt y así incrementar la resolución espectral en la región de bajas frecuencias. Esto supone un aumento sustancial de la misma en detrimento de la obtención de información en la región de altas frecuencias. Al tomar 1 de cada 20 datos, la serie de 8192 queda reducida a 409, debiéndose tomar 256 datos como la potencia de 2 más favorable. El posible valor de 512 datos queda descartado porque supondría rellenar con valores nulos más de un 20 % de la serie. Este remuestreo requirió también el cambio del parámetro “datos por grupo” que fue de 64, según el correspondiente análisis de sensibilidad efectuado.

Una vez obtenidos los espectros de cada una de las series (para cada una de las escalas hidrodinámicas consideradas), se procedió a la comparación del nivel de energía del espectro de la serie original medida, con respecto de los espectros de cada una de las escalas hidrodinámicas, obteniendo su aportación porcentual y absoluta.

A continuación se presentan algunos de los espectros obtenidos en los tests 05051634, 07061220 y 08081547, mostrando el espectro de la serie total de alturas de ola, el espectro correspondiente al intervalo de bajas frecuencias, el espectro filtrado y remuestreado de bajas frecuencias, una superposición de estos últimos (para mostrar la ganancia de resolución conseguida con el postproceso propuesto), el espectro correspondiente al flujo oscilatorio y finalmente el espectro correspondiente a la turbulencia (figuras 5.42 - 5.56).

Las unidades PSD (*Power Spectral Density*) para estos espectros son $\text{cm}^2 \cdot \text{s}$. El resumen de todos los resultados obtenidos y los cálculos efectuados se recogen en la tabla 5.20.

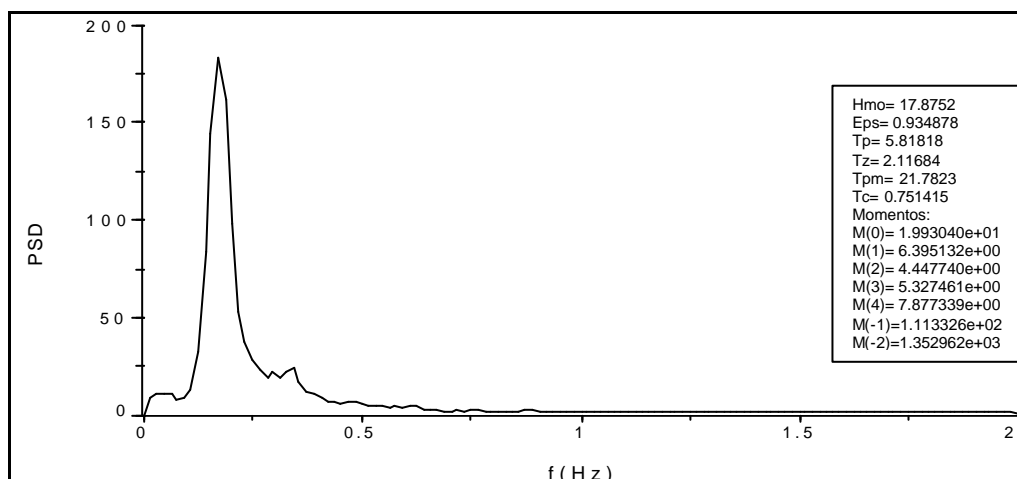


Figura 5.42.- Análisis espectral de la serie total de alturas de ola medida. Test 05051634.

⁴ Por definición, dados esta longitud y este intervalo de muestreo, los límites teóricos de esta serie serían 0.0011 Hz (oscilaciones con periodo máximo de 15 minutos) en el límite inferior y 2 Hz (oscilaciones con periodo mínimo de 0.5 segundos).

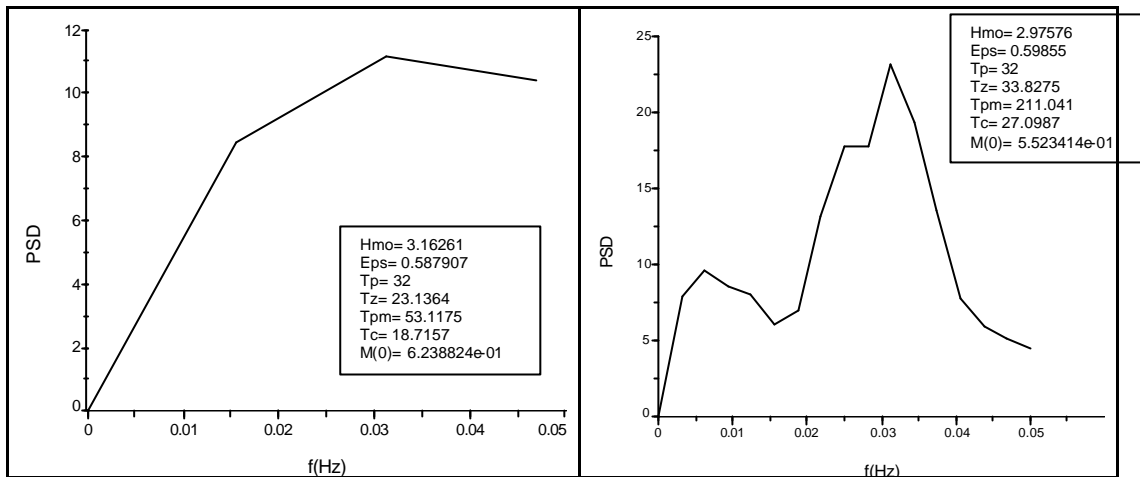


Figura 5.43.- Análisis espectral en el rango de bajas frecuencias, serie completa y serie filtrada y remuestreada respectivamente. Test 05051634.

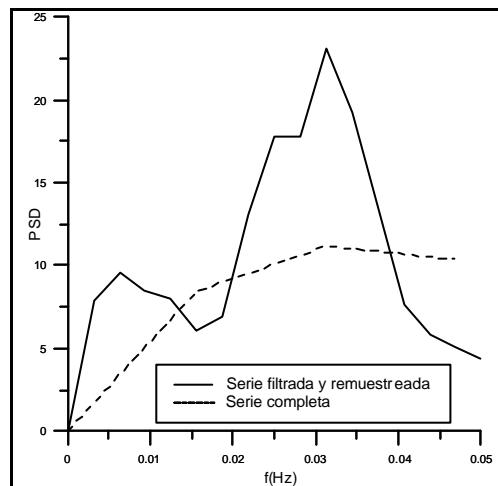


Figura 5.44.- Comparación de los 2 espectros anteriores mostrando la ganancia en resolución y permitiendo un análisis mas detallado de la energía en las bajas frecuencias. Test 05051634.

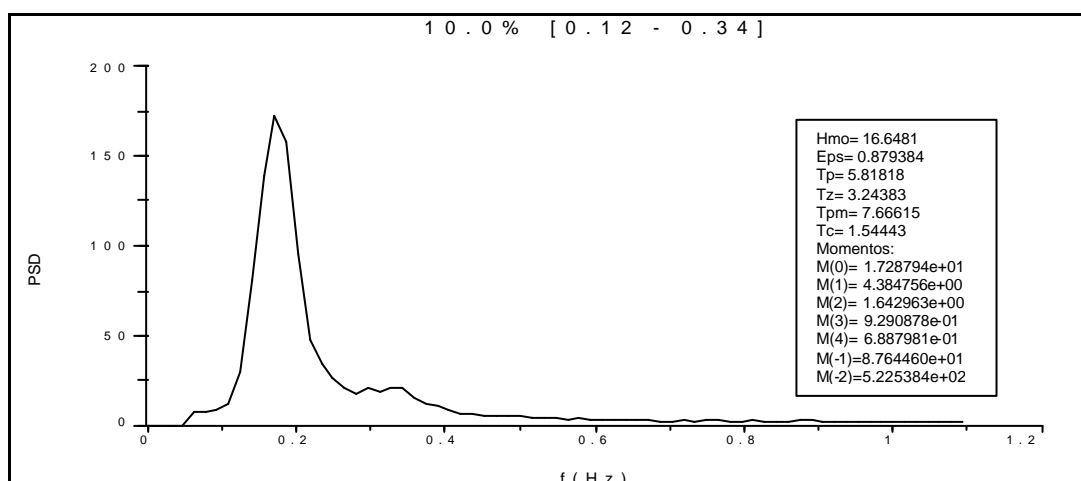


Figura 5.45.- Análisis espectral de la serie filtrada y analizada en el rango correspondiente a flujo oscilatorio. Test 05051634.

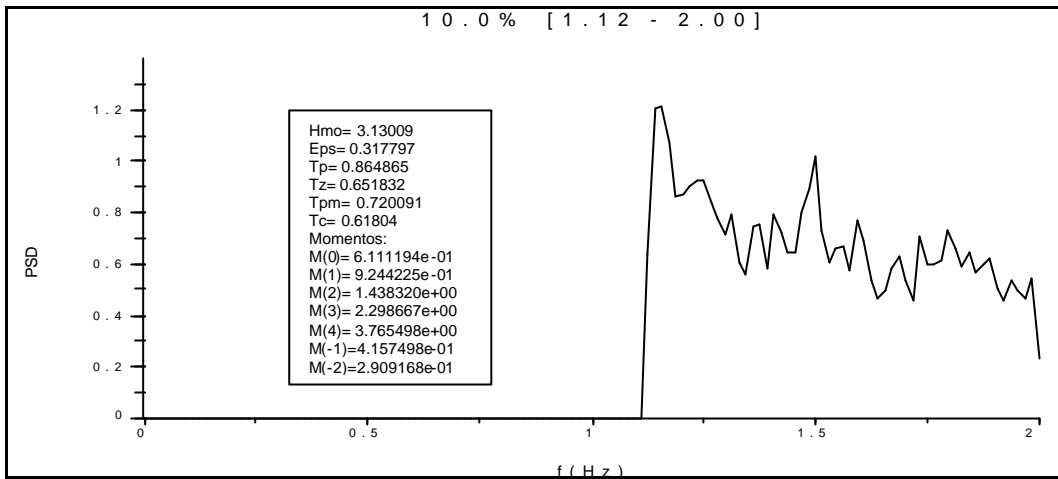


Figura 5.46.- Análisis espectral de la serie filtrada y analizada en el rango de altas frecuencias correspondiente a la turbulencia. Test 05051634.

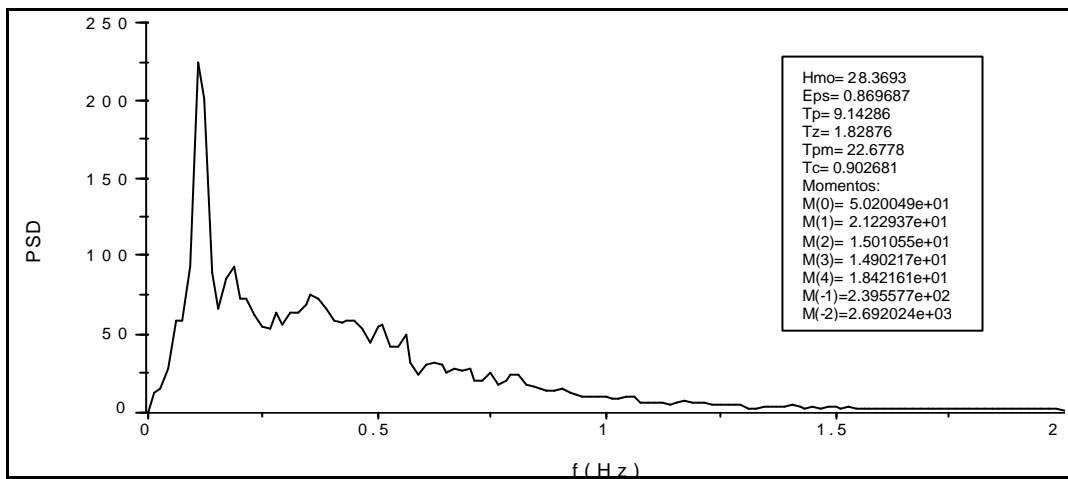


Figura 5.47.- Análisis espectral de la serie total de alturas de ola medida. Test 07061220.

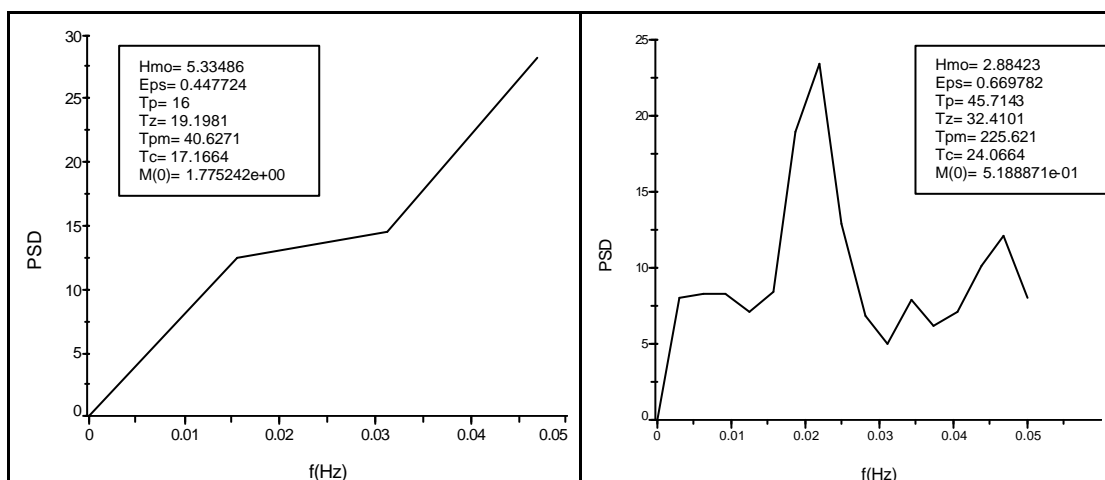


Figura 5.48.- Análisis espectral en el rango de bajas frecuencias, serie completa y serie filtrada y remuestreada respectivamente. Test 07061220.

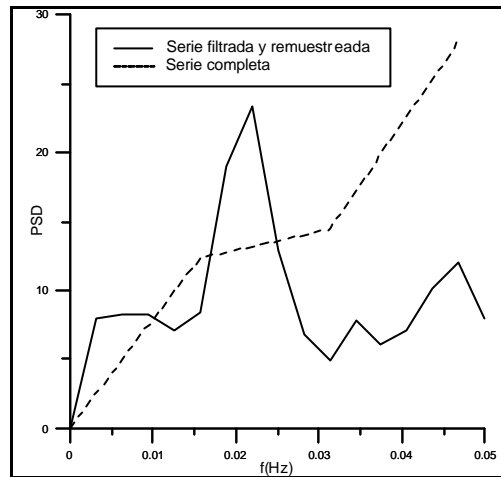


Figura 5.49.- Comparación de los 2 espectros anteriores mostrando la ganancia en resolución y permitiendo un análisis mas detallado de la energía en las bajas frecuencias. Test 07061220.

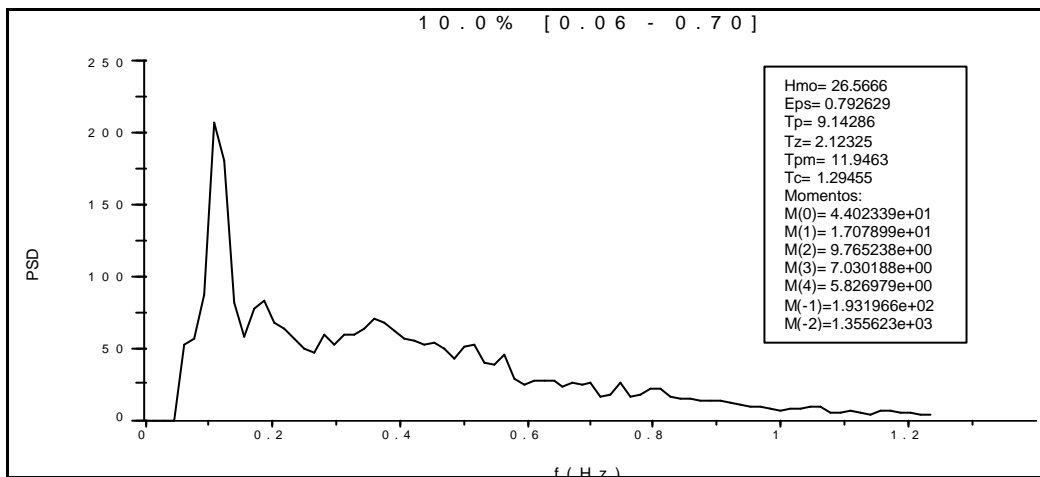


Figura 5.50.- Análisis espectral de la serie filtrada y analizada en el rango correspondiente a flujo oscilatorio. Test 07061220.

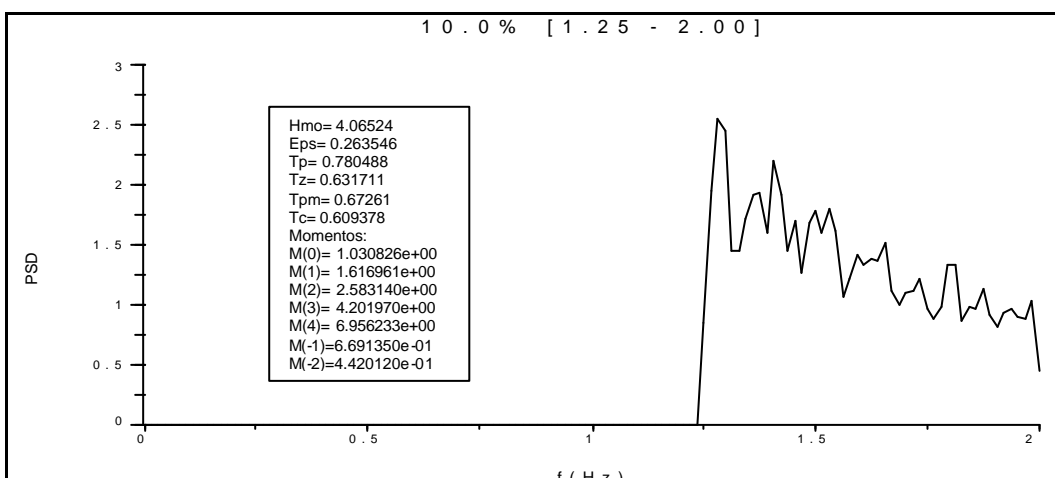


Figura 5.51.- Análisis espectral de la serie filtrada y analizada en el rango de altas frecuencias correspondiente a la turbulencia. Test 07061220.

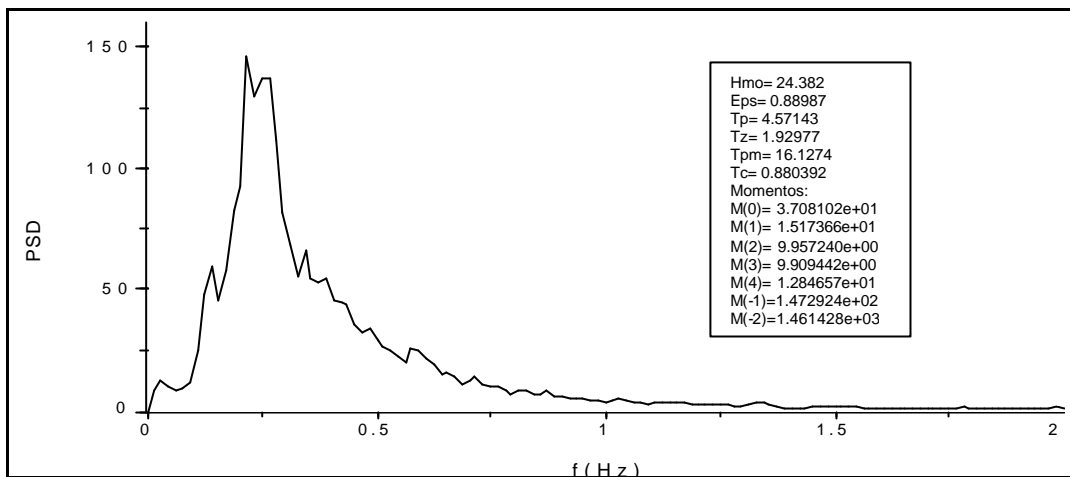


Figura 5.52.- Análisis espectral de la serie total de alturas de ola medida. Test 08081547.

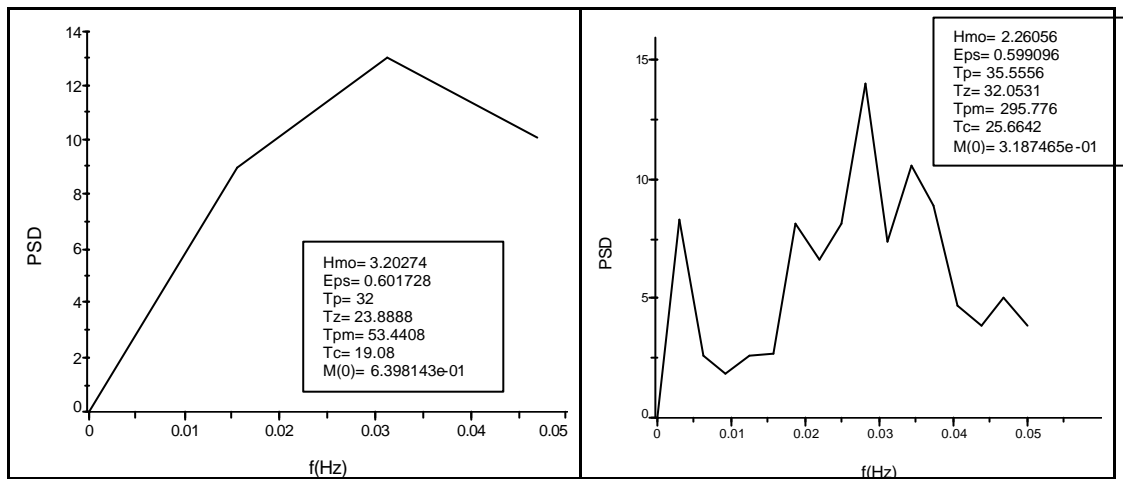


Figura 5.53.- Análisis espectral en el rango de bajas frecuencias, serie completa y serie filtrada y remuestreada respectivamente. Test 08081547.

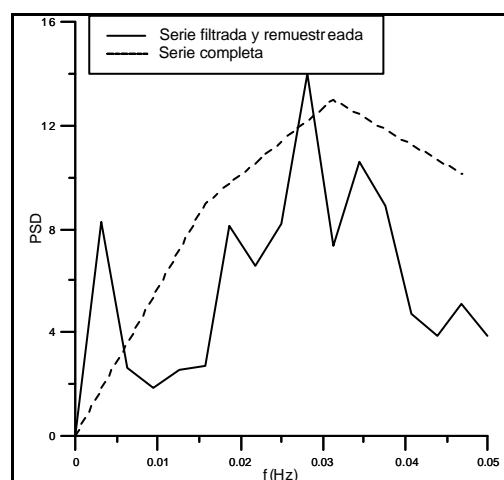


Figura 5.54.- Comparación de los 2 espectros anteriores mostrando la ganancia en resolución y permitiendo un análisis mas detallado de la energía en las bajas frecuencias. Test 08081547.

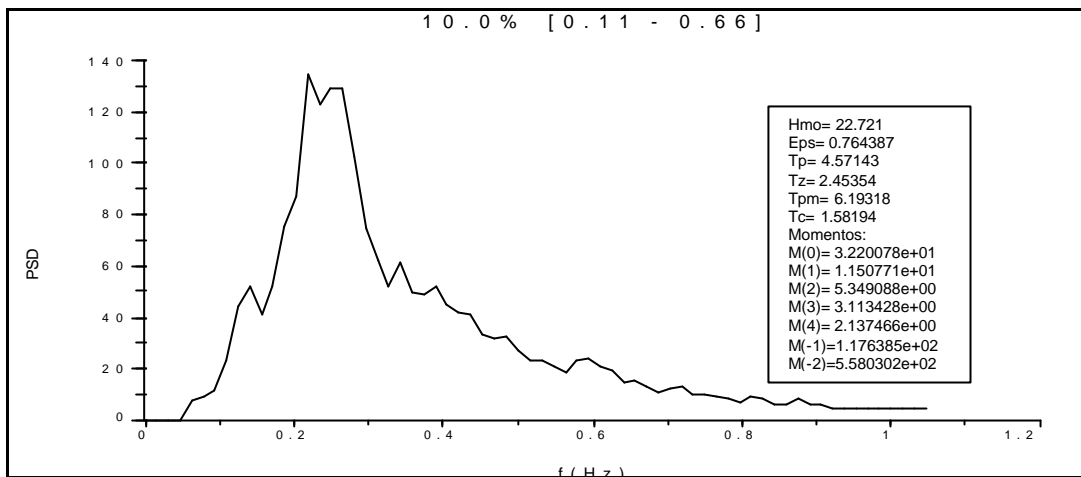


Figura 5.55.- Análisis espectral de la serie filtrada y analizada en el rango correspondiente a flujo oscilatorio. Test 08081547.

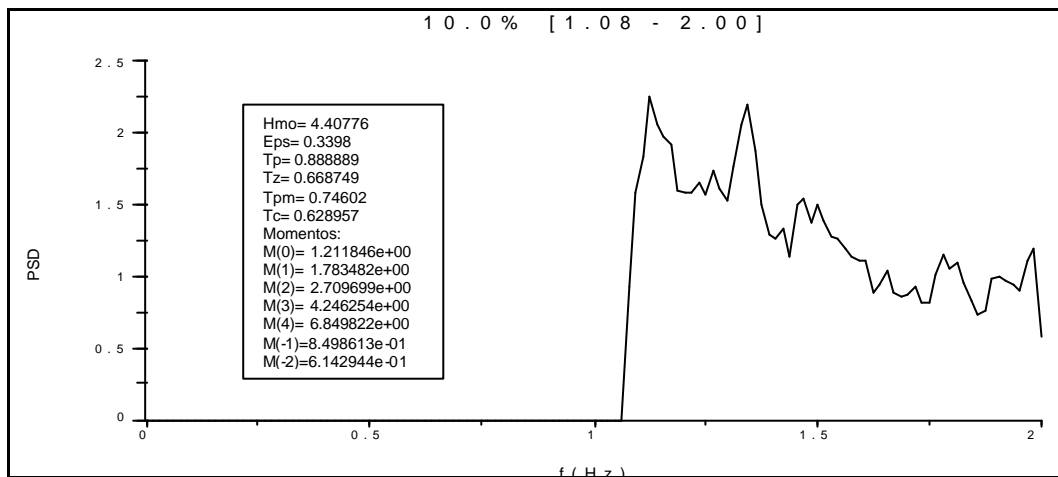


Figura 5.56.- Análisis espectral de la serie filtrada y analizada en el rango de altas frecuencias correspondiente a la turbulencia. Test 08081547.

Test	m ₀ total	m ₀ bjf	% bjf	m ₀ flo	% flo	m ₀ trb	% trb	S 100%
05021149	69.21083	1.09575	1.583206	62.00446	89.5878	1.794334	2.5925625	93.764
05031230	73.8273	1.243174	1.6838947	62.22063	84.278621	2.092885	2.8348389	88.797
05041312	60.1395	0.529721	0.8808204	53.03635	88.188878	0.6105071	1.0151516	90.085
05051634	19.9304	0.5523414	2.7713513	17.28794	86.741561	0.6111194	3.0662676	92.579
05062153	198.7868	5.594037	2.8140888	171.3581	86.201951	1.400326	0.7044361	89.720
05072242	210.8919	6.122486	2.9031395	184.3141	87.39743	1.379097	0.6539355	90.955
05082315	195.7569	4.831394	2.4680581	172.3812	88.058812	1.534435	0.7838472	91.311
05092350	209.3386	5.300674	2.5321054	182.7745	87.310463	2.177353	1.0401106	90.883
06010635	103.5373	2.772209	2.6774979	93.61545	90.417125	0.6821553	0.6588498	93.753
06031315	83.46613	1.504981	1.8031038	72.3019	86.624239	2.883806	3.4550614	91.882
06041450	90.74716	1.089646	1.2007494	78.31654	86.301918	1.540221	1.6972663	89.200
06051530	74.6755	1.752988	2.3474741	60.01676	80.370081	5.3539	7.1695536	89.887
06062304	64.30613	0.5968601	0.9281543	58.19202	90.492182	0.5433729	0.8449784	92.265
06072334	61.87683	1.187436	1.9190317	53.95766	87.20172	0.6363754	1.0284551	90.149
07010858	48.20786	0.5598276	1.1612787	42.92971	89.051267	0.4595423	0.9532518	91.166
07020939	77.6431	0.7193045	0.9264242	67.13863	86.470826	1.33051	1.713623	89.111
07031019	80.02142	0.7460763	0.9323457	69.71622	87.121948	2.96054	3.6996844	91.754
07041059	52.84621	0.5091546	0.9634647	44.58398	84.36552	2.016228	3.8152745	89.144
07051142	44.7642	0.8583442	1.9174791	38.59249	86.212844	1.060817	2.3697888	90.500
07061220	50.20049	0.5188871	1.0336296	44.02339	87.69514	1.030826	2.0534182	90.782
07081609	82.4362	0.4298277	0.5214065	72.56866	88.030089	2.57643	3.1253624	91.677
08010828	73.4454	0.8283582	1.1278558	64.6203	87.984135	0.6446095	0.8776717	89.990
08020913	69.34528	0.7425637	1.0708208	61.06339	88.057024	2.034824	2.9343367	92.062
08030957	79.016	0.5114011	0.6472121	69.32217	87.731814	1.501974	1.9008479	90.280
08041044	72.35161	0.2630132	0.3635209	62.72579	86.695776	2.726103	3.767854	90.827
08051120	58.83555	0.3722589	0.6327108	56.98277	96.850918	1.530161	2.6007422	100.084
08071419	37.45754	0.3965451	1.0586523	31.78732	84.862273	1.137244	3.0360883	88.957
08081547	37.08102	0.3187465	0.8595947	32.20078	86.838981	1.211846	3.2681032	90.967
09010832	67.74474	0.5422322	0.8004049	61.3457	90.554189	0.5509089	0.8132128	92.168
Promedio	84.409928	1.4651806	1.4665337	74.039883	87.606966	1.5866362	2.2232612	91.297

Tabla 5.20.- Resumen de resultados del procesado de series temporales de oleaje (m₀: momento de orden 0; bjf: bajas frecuencias; flo: flujo oscilatorio; trb: turbulencia; S 100%: sumatorio de porcentajes).

5.4.4.2.- Análisis de las series temporales de velocidades

Las series temporales de velocidades, al igual que las de elevaciones de la superficie libre se midieron simultáneamente durante 30 minutos cada una, pero a una frecuencia mucho mayor (20 Hz), lo que supone 36000 datos por cada serie.

Las medidas realizadas en el trineo fueron tomadas respecto a sus propios ejes coordenados, lo que exige tener controladas las variaciones en la orientación del trineo para poder aplicar las correcciones pertinentes a las series.

Las series de velocidad se rotaron, proyectando los ejes del trineo (coordenadas $[x, y]$ locales) mediante los ángulos diferenciales medidos por el compás (brújula) colocado en el trineo. El resultado fueron series depuradas y proyectadas a un sistema de referencia invariante de componentes Norte - Este.

A partir de estas series, se realizó una nueva proyección con un ángulo tal que los registros se separaran en componentes *longshore* o paralela a la costa y *cross-shore* o perpendicular a la costa. Dicho ángulo de 33.9° fue obtenido utilizando los datos topográficos (orientación de la línea de orilla en el Trabucador) y del compás (referidos al N) por la declinación magnética correspondiente.

Estas son las velocidades utilizadas en el presente estudio. En la tabla 5.21 se muestran las medidas de velocidades realizadas con el trineo.

CEM	1		2		3		4		5		6	
Altura	5 cm		10 cm		25 cm		65 cm		65 cm		100 cm	
Canal	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Componente	u_1	v_1	u_2	v_2	u_3	v_3	w_4	$-v_4$	u_5	v_5	u_6	v_6

Tabla 5.21.- Resumen de las medidas (componentes de velocidad y profundidad)

La metodología del proceso de datos es muy similar a la seguida para los datos de elevaciones de la superficie libre:

- Elección del correntímetro a tener en cuenta según la profundidad del trineo.
- Proyección de las componentes de las velocidades según el ángulo medio de propagación del oleaje respecto a la costa. Este ángulo debe ser estimado previamente mediante el método de Madsen (Madsen *et al.*, 1993).
- Separación de los registros proyectados mediante filtro digital y mediante filtro de muestreo según las tres escalas hidrodinámicas consideradas: bajas frecuencias, flujo oscilatorio y turbulencia.
- Acondicionamiento de los datos hasta tener un número igual a una potencia de 2.
- Análisis espectral de las cuatro series: la total y las resultantes de aplicar el filtro.
- Cálculo de la aportación porcentual y absoluta de cada escala hidrodinámica al total de la energía.

5.4.4.2.1.- Elección del correntímetro

La elección del correntímetro estuvo condicionada por la profundidad en el punto de medida del trineo. El criterio seguido ha sido el de considerar el dispositivo más cercano a la superficie que se ha mantenido siempre sumergido, pues éste será el que registre una velocidad mayor sin introducir errores por un eventual contacto con el aire. La serie de tiempo de velocidades y el CEM utilizado para cada test se recogen en la tabla 5.22.

Test	Profundidad (cm)	Correntímetro
05021149	75.15	5
05031230	81.98	5
05041312	75.33	5
05051634	142.62	6
05062153	136.71	6
05072242	137.95	6
05082315	140.10	6
05092350	140.45	6
06010635	147.28	6
06031315	83.61	5
06041450	70.28	5
06051530	76.30	5
06062304	115.08	6
06072334	115.51	6
07010858	119.20	6
07020939	72.11	5
07031019	55.10	3
07041059	73.25	5
07051142	70.20	5
07061220	55.34	3
07081609	133.90	6
08010828	125.96	6
08020913	125.29	6
08030957	88.71	5
08041044	71.76	5
08051120	65.18	5
08071419	168.68	6
08081547	171.96	6
09010832	80.03	5

Tabla 5.22.- Correntímetro utilizado para el análisis de las velocidades.

5.4.4.2.2.- Proyección de las componentes

Para el estudio de las velocidades orbitales, se considera que la dirección a la que se asocia la mayor cantidad de energía es la misma dirección de propagación del oleaje. A tal efecto, se ha aplicado el método de Madsen (Madsen *et al.*, 1993; Jiménez, 1997) para estimar la dirección del oleaje partiendo de las medidas de velocidades orbitales. El

método de obtención del ángulo de propagación del oleaje consiste en que, para cada par de velocidades, u y v , se calcula:

- Suma de las varianzas de cada componente de las velocidades horizontales.
- a_{MAD} : ángulo de cada par de varianzas de (u, v) con respecto al ángulo medio.
- Suavizado de la curva, con una media móvil (arbitraria) de 11° .

En la figura 5.57 se muestra la aplicación de este método para calcular el ángulo de propagación del oleaje para el test 06031315. El ángulo de propagación se obtuvo para todos los test mencionados anteriormente, y los resultados se resumen en la tabla 5.23.

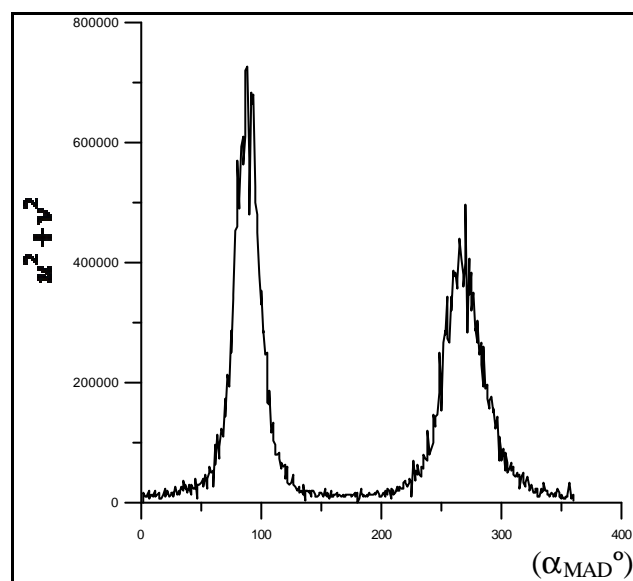


Figura 5.57.- Obtención del ángulo medio de propagación del oleaje por el método de Madsen. Test 06061315

Una vez obtenido el ángulo de propagación del oleaje respecto a la costa, bastará aplicar una rotación a los ejes coordenados *longshore* - *cross-shore*, de tal forma que el nuevo eje *cross-shore* (v') coincida con la dirección de propagación.

Partiendo de un sistema de coordenadas (u, v) y aplicando una matriz de rotación simple:

$$(u', v') = (u, v) \cdot \begin{bmatrix} \cos(90 - a_{MAD}) & \sin(90 - a_{MAD}) \\ -\sin(90 - a_{MAD}) & \cos(90 - a_{MAD}) \end{bmatrix} \quad [5.38]$$

se obtiene una nueva referencia respecto a la Barra del Trabucador tal como muestra la figura 6.2.

Test	α_{MAD} (°)
05021149	85.0
05031230	84.0
05041312	79.0
05051634	85.0
05062153	90.0
05072242	92.0
05082315	90.0
05092350	91.0
06010635	92.0
06031315	88.0
06041450	89.0
06051530	94.0
06062304	83.0
06072334	85.0
07010858	81.0
07020939	84.0
07031019	84.0
07041059	85.0
07051142	87.0
07061220	85.0
07081609	79.0
08010828	82.0
08020913	82.0
08030957	87.0
08041044	80.0
08051120	89.0
08071419	85.0
08081547	91.0
09010832	100.0

Tabla 5.23.- Ángulo medio de propagación del oleaje según el método Madsen para los tests realizados durante la campaña Delta'96.

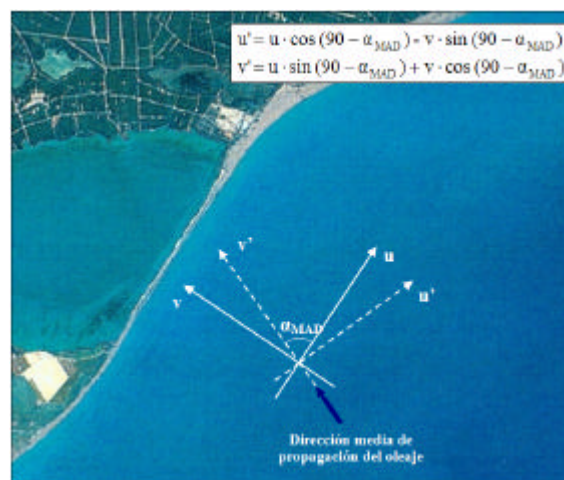


Figura 5.58.- Nuevo sistema coordinado (u', v') considerado en la Barra del Trabucador.

5.4.4.2.3.- Filtrado de las series de velocidades

El filtrado de las series temporales de velocidades proyectadas se ha realizado de la misma forma que las series de alturas de ola. Se han considerado los mismos límites para las escalas hidrodinámicas, así como el mismo valor para la longitud del filtro, obteniéndose tres series de 35490 datos aproximadamente, una para cada escala temporal. La reducción de 36000 a 35490 responde a la acción del filtro.

5.4.4.2.4.- Análisis espectral de las series de velocidades

Después de realizado el filtrado de las series de velocidades, el número de datos potencia de 2 más favorable es de 32768 (2^{15}). Dado que se dispone de 35490, no es necesario realizar la eliminación de la tendencia ni el rellenado de la serie. El mismo programa de análisis espectral usa la longitud de 2^{15} datos de manera automática. De esta forma, se ha obtenido la función de densidad espectral y la cantidad de energía asociada de cada una de las escalas hidrodinámicas consideradas.

Al igual que en el estudio de las escalas hidrodinámicas estudiadas a partir de los datos de oleaje, fue necesario remuestrear la serie (tomando 1 de cada 100 datos para las bajas frecuencias, y 1 de cada 5 datos para el flujo oscilatorio) para ganar resolución espectral en el rango de interés (mismo criterio que en el análisis del oleaje).

Tal y como se ha llevado a cabo con los registros de oleaje, una vez obtenidos los espectros de cada una de las series de velocidades, se ha procedido a la comparación del nivel de energía del espectro de la serie total frente a los espectros de cada una de las escalas hidrodinámicas, obteniendo su aportación porcentual y absoluta.

A continuación se presentan algunos de los espectros obtenidos en los tests 05051634, 07061220 y 08081547, mostrando el espectro de la serie total de velocidades, el espectro correspondiente al intervalo de bajas frecuencias, el espectro filtrado y remuestreado de bajas frecuencias, una superposición de estos últimos (para mostrar la ganancia de resolución conseguida con el postproceso propuesto), el espectro correspondiente al flujo oscilatorio y finalmente el espectro correspondiente a la turbulencia (figuras 5.59 - 5.73).

Las unidades PSD (*Power Spectral Density*) para estos espectros son $[(\text{cm/s})^2 \cdot \text{s}]$. El resumen de todos los resultados obtenidos y los cálculos efectuados se recogen en la tabla 5.24.

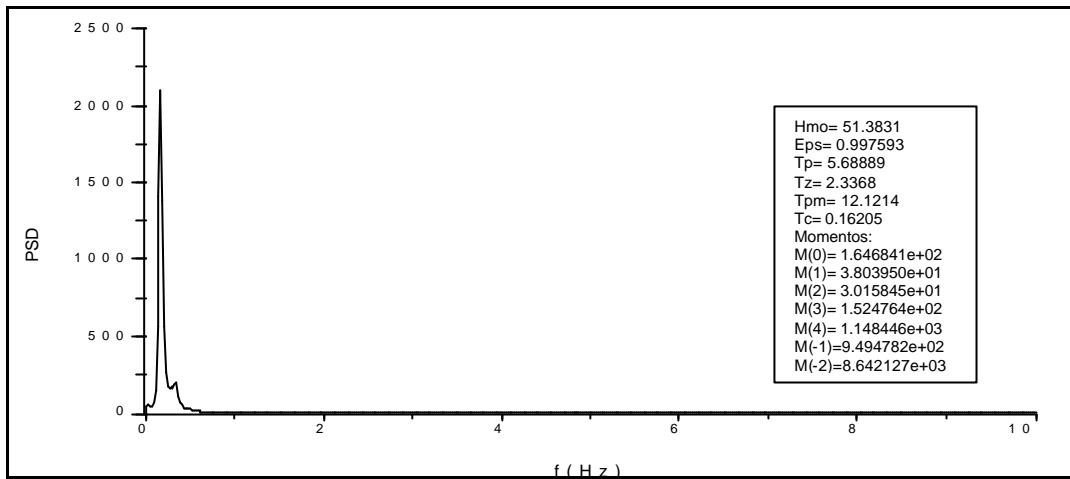


Figura 5.59.- Análisis espectral de la serie total de alturas de ola medida. Test 05051634.

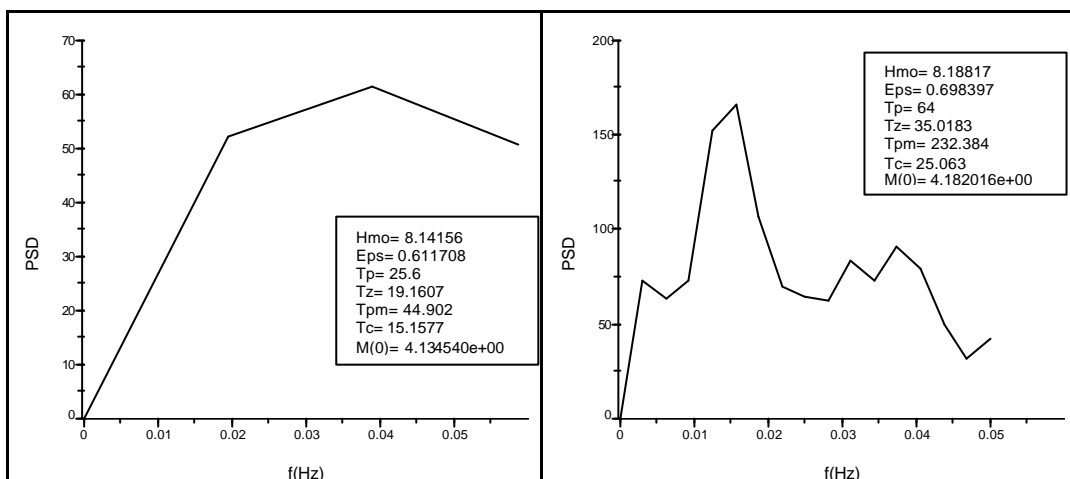


Figura 5.60.- Análisis espectral en el rango de bajas frecuencias, serie completa y serie filtrada y remuestreada respectivamente. Test 05051634.

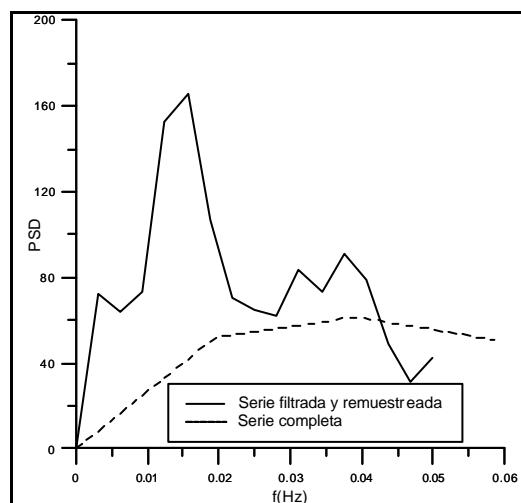


Figura 5.61.- Comparación de los 2 espectros anteriores mostrando la ganancia en resolución y permitiendo un análisis mas detallado de la energía en las bajas frecuencias. Test 05051634.

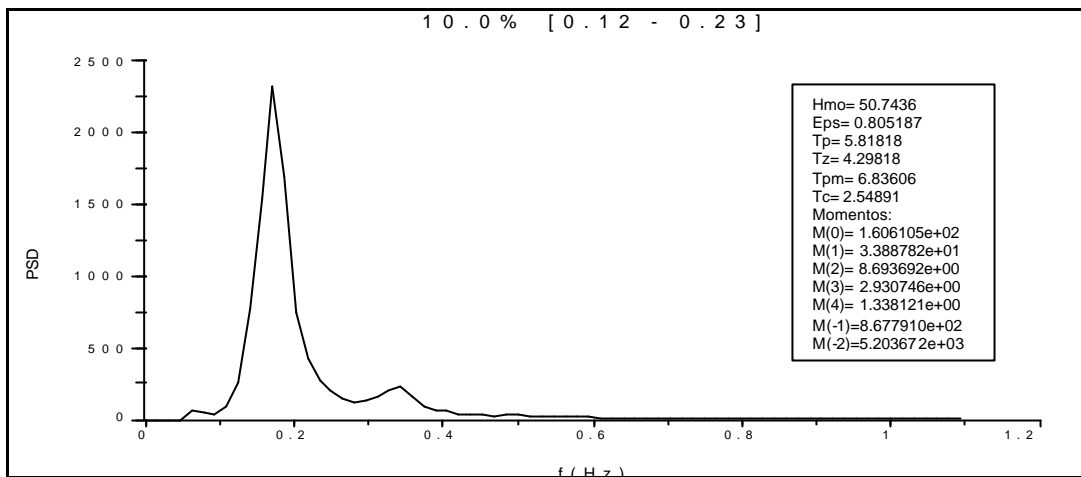


Figura 5.62.- Análisis espectral de la serie filtrada y analizada en el rango correspondiente a flujo oscilatorio. Test 05051634.

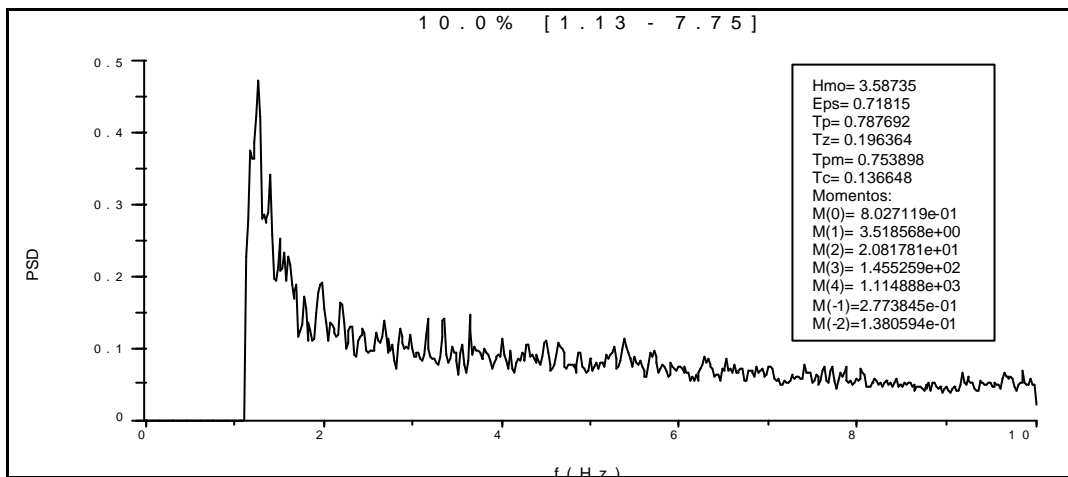


Figura 5.63.- Análisis espectral de la serie filtrada y analizada en el rango de altas frecuencias correspondiente a la turbulencia. Test 05051634.

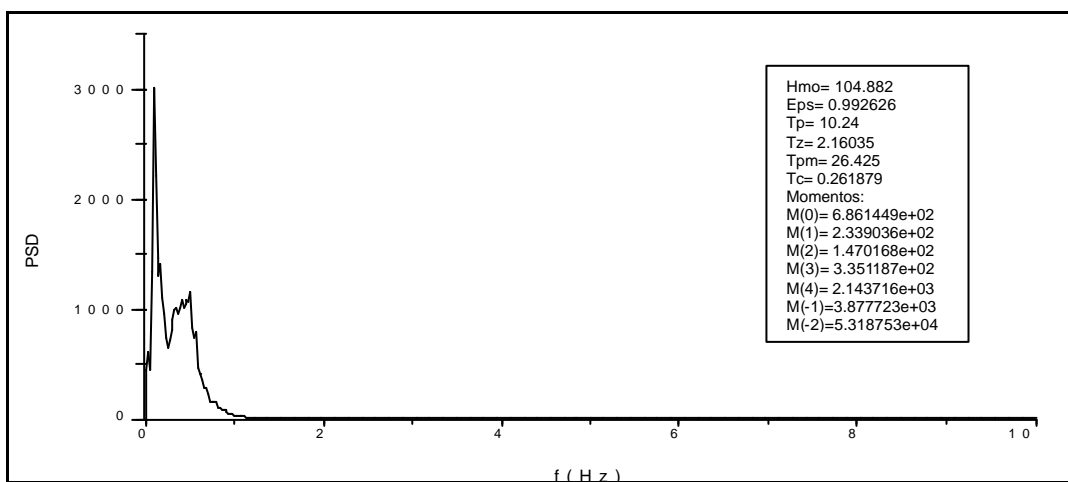


Figura 5.64.- Análisis espectral de la serie total de alturas de ola medida. Test 07061220.

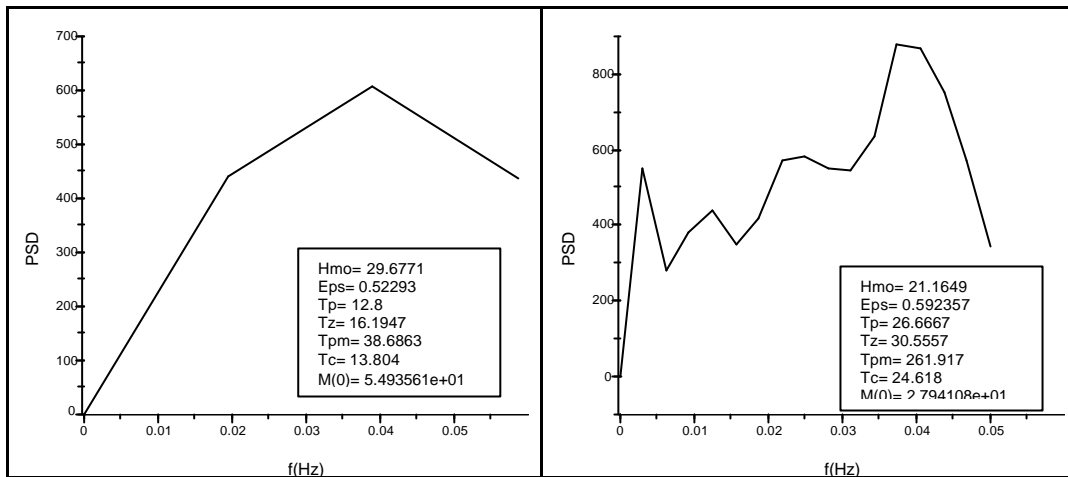


Figura 5.65.- Análisis espectral en el rango de bajas frecuencias, serie completa y serie filtrada y remuestreada respectivamente. Test 07061220.

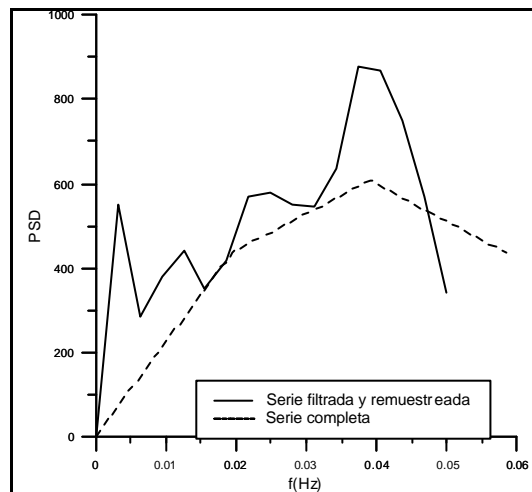


Figura 5.66.- Comparación de los 2 espectros anteriores mostrando la ganancia en resolución y permitiendo un análisis mas detallado de la energía en las bajas frecuencias. Test 07061220.

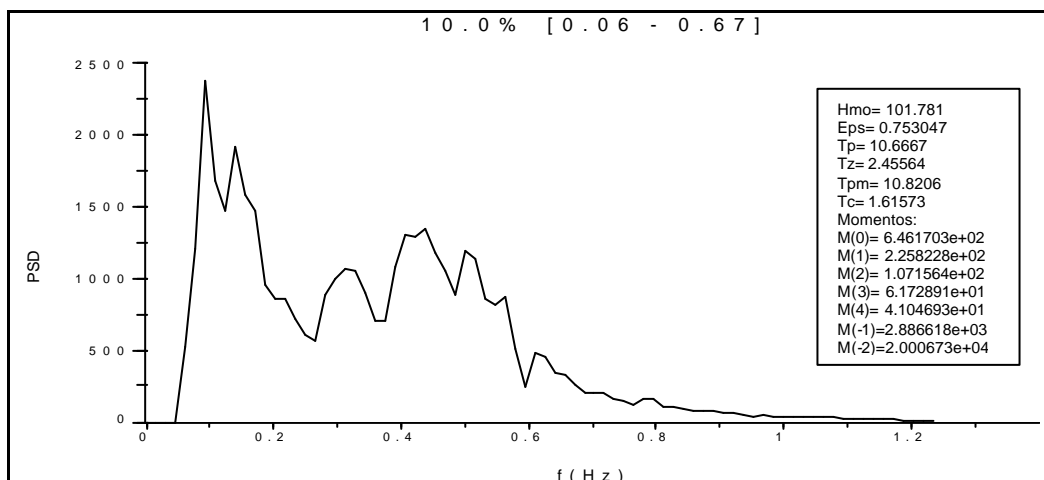


Figura 5.67.- Análisis espectral de la serie filtrada y analizada en el rango correspondiente a flujo oscilatorio. Test 07061220.

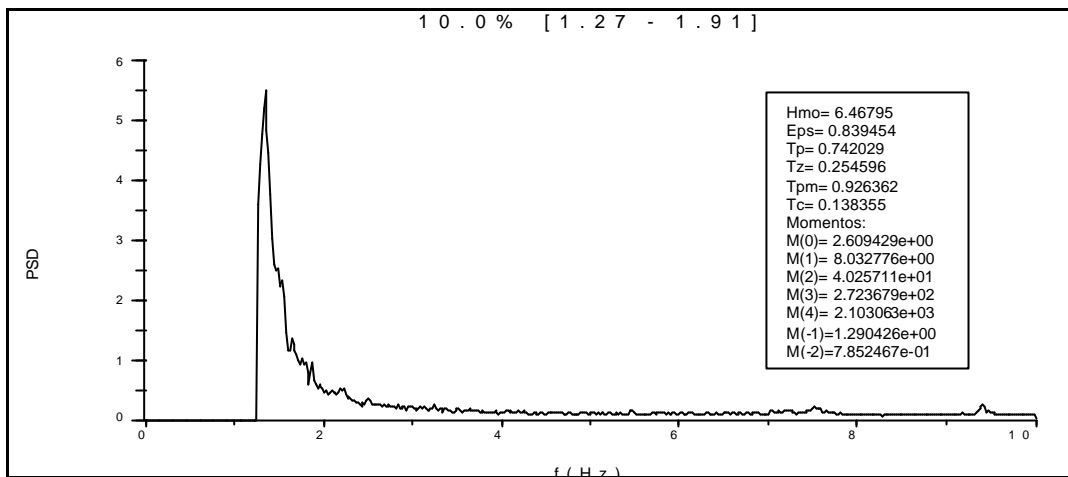


Figura 5.68.- Análisis espectral de la serie filtrada y analizada en el rango de altas frecuencias correspondiente a la turbulencia. Test 07061220.

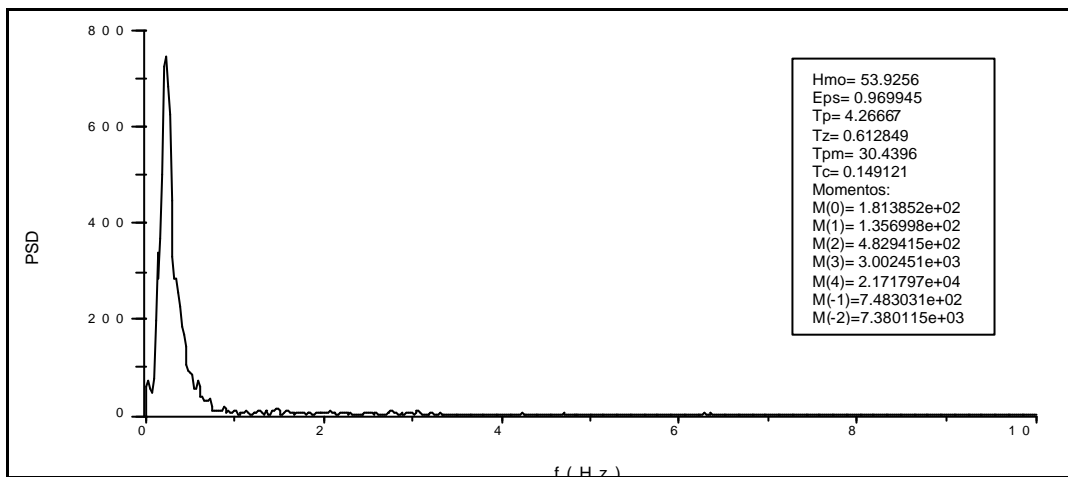


Figura 5.69.- Análisis espectral de la serie total de alturas de ola medida. Test 08081547.

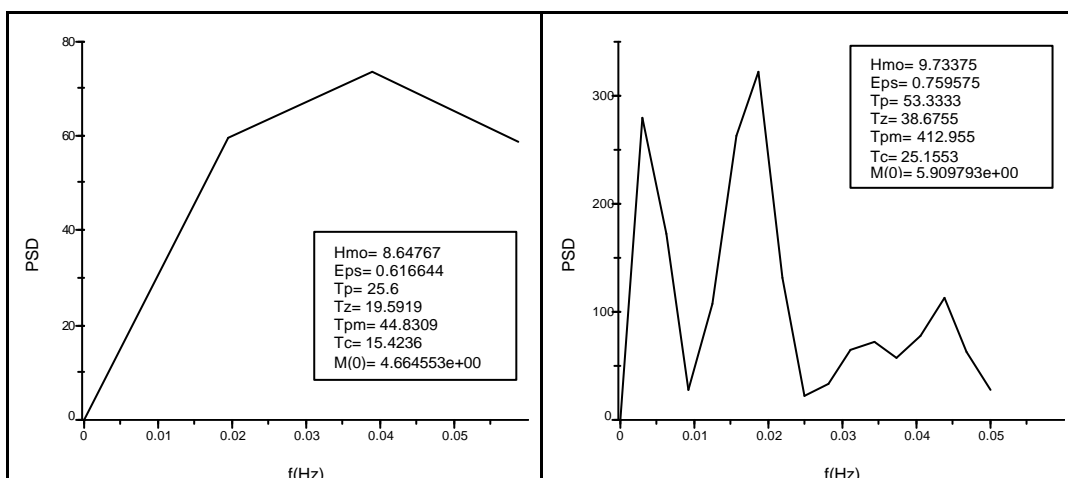


Figura 5.70.- Análisis espectral en el rango de bajas frecuencias, serie completa y serie filtrada y remuestreada respectivamente. Test 08081547.

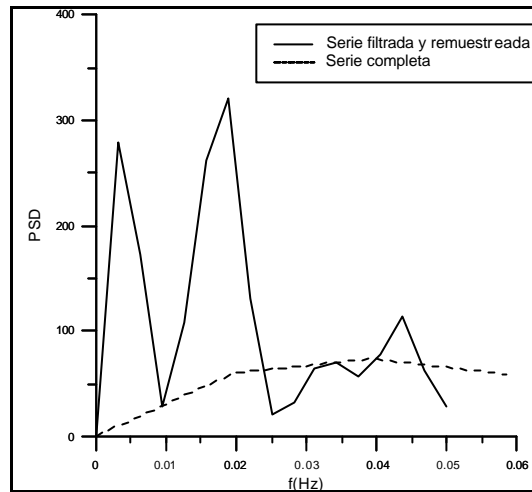


Figura 5.71.- Comparación de los 2 espectros anteriores mostrando la ganancia en resolución y permitiendo un análisis más detallado de la energía en las bajas frecuencias. Test 08081547.

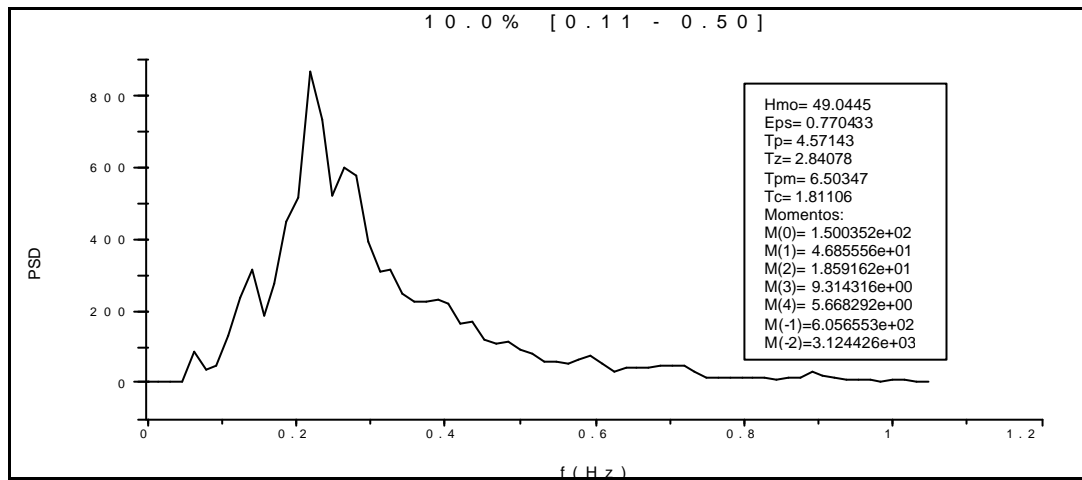


Figura 5.72.- Análisis espectral de la serie filtrada y analizada en el rango correspondiente a flujo oscilatorio. Test 08081547.

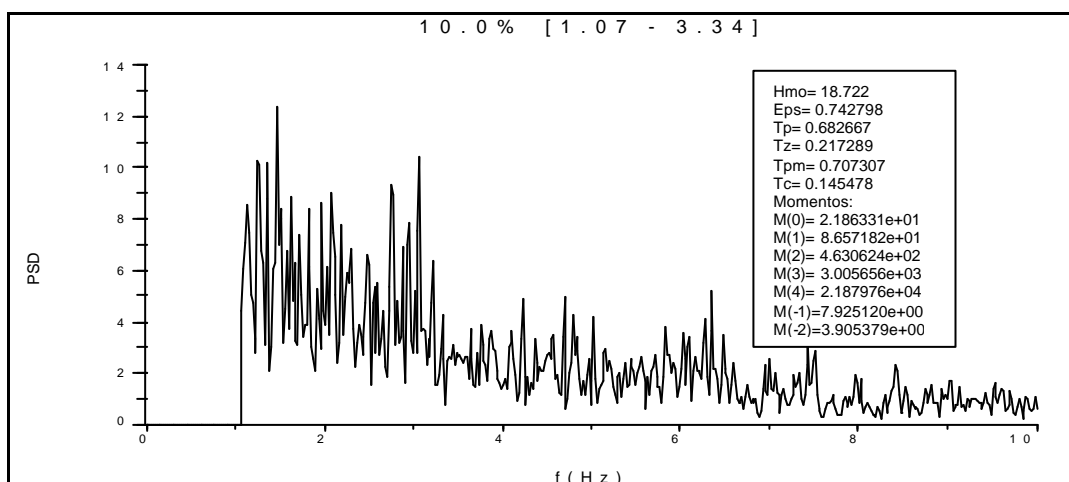


Figura 5.73.- Análisis espectral de la serie filtrada y analizada en el rango de altas frecuencias correspondiente a la turbulencia. Test 08081547.

Test	m_0 total	m_0 bjf	% bjf	m_0 flo	% flo	m_0 trb	% trb	S 100%
05021149	1016.155	25.90887	2.5496967	675.6331	66.489177	310.7997	30.585856	99.625
05031230	693.2232	30.61155	4.4158288	628.7106	90.69382	38.73993	5.5883776	100.698
05041312	746.2488	21.54858	2.8875866	641.211	85.92456	124.6389	16.702057	105.514
05051634	164.6841	4.182016	2.539417	160.6105	97.526416	0.8027119	0.4874253	100.553
05062153	1436.681	101.8152	7.0868342	1478.258	102.89396	5.579107	0.388333	110.369
05072242	1555.977	66.87622	4.2980211	1573.334	101.1155	3.032786	0.194912	105.608
05082315	1497.344	85.39126	5.7028485	1574.091	105.12554	4.673453	0.3121162	111.141
05092350	1520.588	66.08828	4.3462319	1407.6	92.569453	2.623977	0.1725633	97.088
06010635	746.5378	32.73318	4.3846648	775.4141	103.86803	0.9454193	0.1266405	108.379
06031315	948.274	26.38465	2.7823867	860.4113	90.734461	30.68561	3.2359434	96.753
06041450	905.1185	25.15966	2.779709	710.8312	78.534601	193.7683	21.408059	102.722
06051530	753.6408	37.54728	4.9821188	675.8278	89.675055	62.33347	8.2709787	102.928
06062304	620.9683	23.77618	3.8288879	454.6454	73.215557	173.935	28.010287	105.055
06072334	551.9388	20.82428	3.7729328	442.7101	80.209998	125.0401	22.654704	106.638
07010858	467.381	10.58544	2.2648417	414.2921	88.641194	51.83538	11.090605	101.997
07020939	886.8499	19.37167	2.1843234	698.3549	78.745558	158.5437	17.877174	98.807
07031019	1033.16	49.13156	4.7554648	945.4172	91.507337	15.53193	1.5033422	97.766
07041059	629.4749	33.77313	5.3652862	508.4708	80.776978	42.04094	6.6787317	92.821
07051142	664.5368	19.92283	2.9980025	527.8225	79.427129	126.8068	19.081983	101.507
07061220	686.1449	27.94108	4.0721836	646.1703	94.174029	2.609429	0.3803029	98.627
07081609	530.2296	6.35718	1.1989485	504.4004	95.128676	3.603237	0.6795616	97.007
08010828	723.3147	32.47393	4.4895991	692.0468	95.677137	21.60168	2.9864843	103.153
08020913	645.0834	18.81507	2.916688	618.6137	95.896701	12.32589	1.9107436	100.724
08030957	868.0585	37.54876	4.3256025	800.1918	92.181783	24.10744	2.7771677	99.285
08041044	831.1537	50.14064	6.0326556	461.6729	55.546032	303.0858	36.465674	98.044
08051120	693.0148	34.66159	5.0015656	351.686	50.747257	304.4401	43.929812	99.679
08071419	173.8967	2.878174	1.6551056	171.1346	98.411643	0.5124169	0.2946674	100.361
08081547	181.3852	5.909793	3.2581451	150.0352	82.716341	21.86331	12.053525	98.028
09010832	947.318	29.03769	3.0652526	950.2827	100.31296	23.46252	2.4767312	105.855
Promedio	797.18557	32.668819	3.7910631	706.89241	87.533341	75.516174	10.287061	101.611

Tabla 5.24.- Resumen de resultados del procesado de series temporales de velocidades (m_0 : momento de orden 0; bjf: bajas frecuencias; flo: flujo oscilatorio; trb: turbulencia; S 100%: sumatorio de porcentajes).

La manipulación a la que se han sometido las series de datos, ha propiciado que la suma de los porcentajes relativos a las energías de cada escala hidrodinámica no tenga como resultado el 100%. Para hacer un estudio comparativo entre los resultados de las series temporales de alturas de ola y las series temporales de velocidades se ha creído conveniente normalizar los porcentajes de ambas obteniendo la tabla 5.25.

Test	CxNorm	m _o total	%bjf Nr	%flo Nr	%trb Nr	CxNorm	m _o total	%bjf Nr	%flo Nr	%trb Nr
05021149	1.067	73.814	1.689	95.546	2.765	1.004	1019.983	2.559	66.740	30.701
05031230	1.126	83.141	1.896	94.911	3.192	0.993	688.418	4.385	90.065	5.550
05041312	1.110	66.759	0.978	97.895	1.127	0.948	707.250	2.737	81.434	15.829
05051634	1.080	21.528	2.993	93.694	3.312	0.994	163.778	2.525	96.990	0.485
05062153	1.114	221.562	3.136	96.078	0.785	0.906	1301.705	6.421	93.227	0.352
05072242	1.099	231.865	3.192	96.089	0.719	0.947	1473.345	4.070	95.746	0.185
05082315	1.095	214.385	2.703	96.439	0.858	0.900	1347.253	5.131	94.588	0.281
05092350	1.100	230.339	2.786	96.069	1.144	1.030	1566.192	4.477	95.346	0.178
06010635	1.067	110.436	2.856	96.441	0.703	0.923	688.819	4.046	95.837	0.117
06031315	1.088	90.840	1.962	94.277	3.760	1.034	980.100	2.876	93.780	3.345
06041450	1.121	101.735	1.346	96.751	1.903	0.973	881.131	2.706	76.453	20.841
06051530	1.113	83.077	2.612	89.412	7.976	0.972	732.201	4.840	87.124	8.036
06062304	1.084	69.697	1.006	98.078	0.916	0.952	591.090	3.645	69.693	26.663
06072334	1.109	68.638	2.129	96.730	1.141	0.938	517.583	3.538	75.217	21.245
07010858	1.097	52.879	1.274	97.681	1.046	0.980	458.232	2.221	86.906	10.874
07020939	1.122	87.131	1.040	97.037	1.923	1.012	897.557	2.211	79.696	18.093
07031019	1.090	87.213	1.016	94.952	4.032	1.023	1056.767	4.864	93.598	1.538
07041059	1.122	59.282	1.081	94.639	4.280	1.077	678.160	5.780	87.024	7.195
07051142	1.105	49.463	2.119	95.263	2.619	0.985	654.670	2.953	78.248	18.799
07061220	1.102	55.298	1.139	96.600	2.262	1.014	695.700	4.129	95.486	0.386
07081609	1.091	89.920	0.569	96.022	3.409	1.031	546.588	1.236	98.064	0.701
08010828	1.111	81.615	1.253	97.771	0.975	0.969	701.204	4.352	92.752	2.895
08020913	1.086	75.324	1.163	95.650	3.187	0.993	640.446	2.896	95.207	1.897
08030957	1.108	87.523	0.717	97.178	2.106	1.007	874.314	4.357	92.846	2.797
08041044	1.101	79.659	0.400	95.451	4.148	1.020	847.732	6.153	56.654	37.193
08051120	0.999	58.786	0.632	96.769	2.599	1.003	695.249	5.018	50.911	44.071
08071419	1.124	42.107	1.190	95.397	3.413	0.996	173.270	1.649	98.057	0.294
08081547	1.099	40.763	0.945	95.462	3.593	1.020	185.034	3.324	84.380	12.296
09010832	1.085	73.502	0.868	98.249	0.882	0.945	894.921	2.896	94.765	2.340

Tabla 5.25.- Resultados normalizados de las series de oleaje y resultados normalizados de las series de velocidades.

De esta tabla correspondiente a las series de alturas de ola cabe destacar que las mediciones concentran prácticamente toda la energía en el flujo oscilatorio. Los porcentajes se encuentran entre el 89.4% y el 98.2%.

La energía correspondiente a las bajas frecuencias se encuentra en todos los casos entre el 0.4% y el 3.2%. Los valores más elevados corresponden a los episodios registrados la noche del día 5 donde se presentó el oleaje con más energía asociada.

Ese mismo día, el porcentaje de turbulencia medido fue muy bajo. Esto puede deberse al hecho de que, por tratarse de un oleaje con mayor altura de ola, su rotura se produjo antes del trineo y fue de tipo *plunging*. En este tipo de rotura, buena parte de la energía turbulenta se disipa en el preciso instante en que la ola rompe, y por tanto, el trineo situado por detrás de la línea de rompientes no encontró turbulencia que medir.

La escala turbulenta oscila entre los porcentajes 0.7% y 4.2% exceptuando el caso correspondiente al test 06051530 donde este valor alcanza casi el 8%. Cabe recalcar que, para este caso, la frecuencia de corte considerada fue de 0.80 Hz, menor que la media, con lo cual podría estarse considerando parte del flujo oscilatorio como turbulencia.

También es interesante resaltar (tal como se puede apreciar en la tabla 5.25) que los resultados del análisis de series de velocidades tienen una correspondencia notable con los valores obtenidos en el análisis del oleaje. En el caso ya citado del día 5 por la noche, la concordancia es muy significativa.

En general, los valores de turbulencia obtenidos mediante los correntímetros son mayores, puesto que son los dispositivos adecuados para medir esta escala hidrodinámica (figura 5.74). El intervalo de porcentajes va de 0.1% a 44%. Este último valor, así como los otros valores elevados, corresponden a olas que rompen justo delante del trineo. En algunos casos, el nivel de turbulencia registrado es menor que el registrado por el sensor de oleaje, hecho que a priori no tiene razón de ser. Cabe buscar su causa en la manipulación numérica a la que se han sometido las series de datos.

Los valores correspondientes a bajas frecuencias, si bien son más elevados que los de la tabla “normalizada” (tabla 5.25), debido a la mayor precisión de los correntímetros, no presentan ningún rasgo característico del que se pueda extraer ninguna singularidad (figura 5.75).

En relación al flujo oscilatorio, de nuevo se presenta como la aportación más importante de energía con valores entre el 50.9% y el 98%, siendo el porcentaje medio del 86.1 % (figura 5.76).

Los valores promedio obtenidos correspondientes a cada escala hidrodinámica según el sensor de alturas de ola y según los correntímetros se resumen en la tabla 5.26.

Escala Hidrodinámica	Sensor de oleaje	Correntímetros
Bajas Frecuencias	1.6 %	3.7 %
Flujo Oscilatorio	95.9 %	86.1 %
Turbulencia	2.4 %	10.1 %

5.26.- Porcentajes medios medidos según escalas hidrodinámicas.

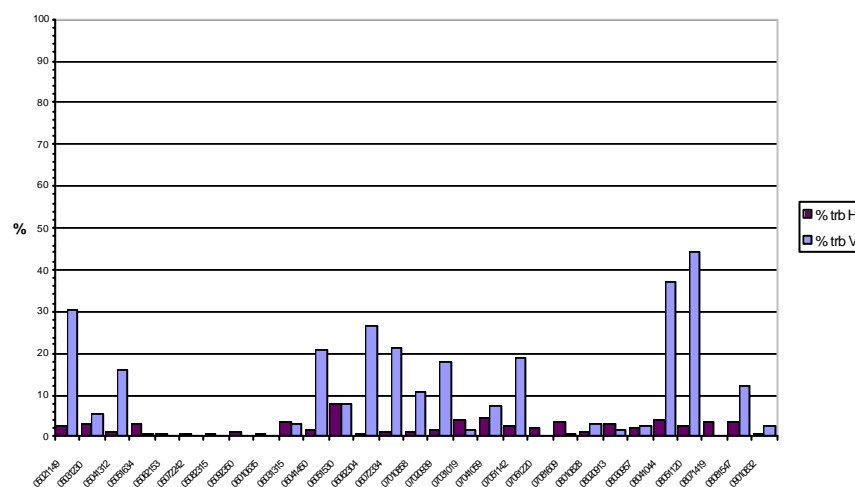


Figura 5.74.- Comparativa en % de valores de turbulencia según las series de oleaje (trb H) y las series de velocidades (trb V).

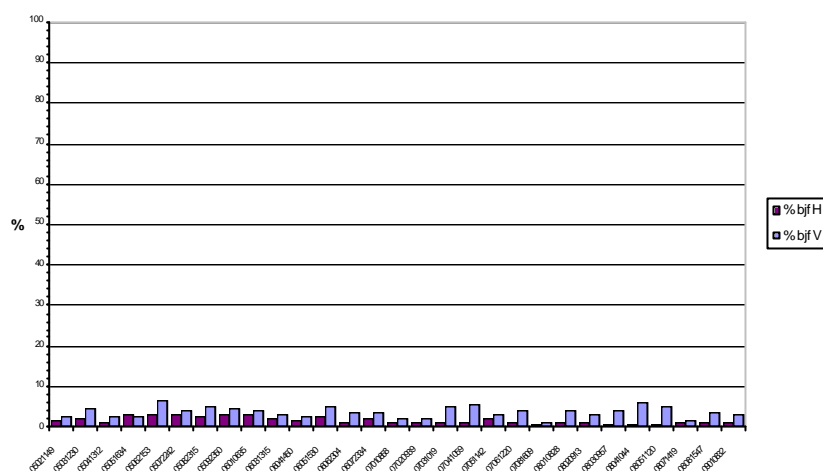


Figura 5.75.- Comparativa en % de valores de bajas frecuencias según las series de oleaje (bjf H) y las series de velocidades (bjf V).

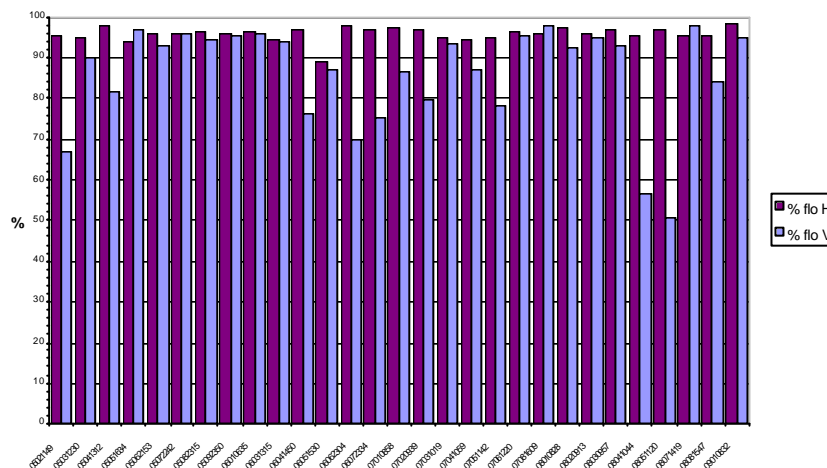


Figura 5.76.- Comparativa en % de valores de flujo oscilatorio según las series de oleaje (flo H) y las series de velocidades (flo V).

Para terminar de perfilar un análisis mas completo de los resultados obtenidos en la tabla 5.25 sería conveniente determinar la posición del trineo respecto a la línea de rotura del oleaje, así como el parámetro de Iribarren para determinar el tipo de rotura en cada caso.

5.5.- Corrientes longitudinales.

En este apartado se presentan algunos resultados experimentales de las corrientes longitudinales medidas en las campañas Delta'93 (Rodríguez, 1997), y su comparación con modelos numéricos basados en los trabajos de Fredsøe (1984) y Sánchez Arcilla *et al.* (1992). Los resultados muestran que los perfiles verticales de velocidades medidos con los correntímetros del trineo siguen una distribución logarítmica (y no cuasi

uniforme), mientras que en planta, la distribución transversal de la corriente longitudinal mostró que el máximo varía en función del tipo de oleaje en rotura, desplazándose hacia el seno del perfil transversal. Otro resultado de utilidad de esta sección es la determinación de la altura de rugosidad y el coeficiente de fricción, que se comparan con distintas expresiones citadas en el estado del arte, mostrando la importancia de considerar las formas del fondo. Como se ha señalado a lo largo de esta tesis, la interacción entre el flujo oscilatorio (asociado al oleaje) y las corrientes costeras es de naturaleza compleja y no lineal. En la actualidad existen numerosos modelos (conceptuales y numéricos) que abordan el estudio de estos procesos. Una excelente revisión de los modelos existentes puede verse en Justensen (1988) y más recientemente en Cáceres (2004). No obstante, dentro de la zona de rompientes, donde las corrientes son generadas principalmente por la rotura del oleaje, se ha estudiado menos. La circulación en la zona cercana a la costa en general, y en la zona de rompientes en particular, tienen una estructura tridimensional sumamente compleja, por lo que, a día de hoy, es absolutamente necesario estudiarla y analizarla en forma simplificada, descomponiendo su estructura tridimensional en patrones de circulación simplificada. Dada la complejidad de medir en dichas condiciones, existe poca información experimental disponible, entre la que se puede citar a Thornton *et al.* (1995), Elfrink *et al.* (1996) y Rodríguez *et al.* (1994, 1997).

Normalmente se asume que, para playas idealizadas (longitudinalmente uniformes, con una pendiente suave y monótona), la circulación inducida por la rotura del oleaje puede “descomponerse” en tres tipos principales de corriente:

- Corrientes longitudinales paralelas a la costa.
- Corrientes de retorno o celdas de circulación (*Rip Currents*).
- Corrientes de resaca (*undertow*).

Para el cálculo de esta circulación costera se han aplicado desde hace tiempo las ecuaciones verticalmente integradas de conservación de masa y cantidad de movimiento y promediadas a la escala temporal de las corrientes. Estas ecuaciones reciben el nombre de ecuaciones de aguas poco profundas, que de acuerdo con Phillips (1977), pueden expresarse de la siguiente forma:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial(hU)}{\partial x} + \frac{\partial(hV)}{\partial y} = 0 \quad [5.39]$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{1}{(\rho h)} \left[F_x + \tau_{sx} - \tau_{bx} + \frac{\partial Re_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial Re_{xy}}{\partial y} \right] \quad [5.40]$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} = \frac{1}{(\rho h)} \left[F_y + \tau_{sy} - \tau_{by} + \frac{\partial Re_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial Re_{yy}}{\partial y} \right] \quad [5.41]$$

donde U y V , son las componentes horizontales del flujo medio verticalmente integrado (2DH), η representa las variaciones de la superficie promediando el efecto de las olas respecto de un nivel de referencia (e.g. el nivel medio del mar), h es la profundidad media incluyendo las variaciones respecto del nivel medio (*set-up*), F_x y F_y representan los términos impulsores debidos al oleaje (gradientes espaciales del tensor de radiación como fue propuesto por Longuett-Higgins, 1970a, b), τ representa las tensiones horizontales en la superficie debidas al viento y en el fondo debidas a la fricción, y Re_{ij} es el tensor de tensiones horizontales turbulentas de Reynolds. Estas tensiones horizontales pueden calcularse a través de la hipótesis de Boussinesq como proporcionales a los gradientes horizontales de las corrientes a través de la viscosidad turbulenta, ν_{th} , utilizando a su vez distintas formulaciones de cierre. No obstante, para la circulación en la zona de rompientes, este tipo de formulaciones 2DH suelen no ser suficientes dada la tridimensionalidad del flujo, por lo cual son necesarias aproximaciones más generales, como por ejemplo las formulaciones cuasi tridimensionales (Q3D) presentadas por Sánchez-Arcilla *et al.* (1992) y Collado (1996).

5.5.1.- Datos experimentales

Los datos experimentales utilizados son los obtenidos durante los experimentos denominados Delta'93, realizados en la barra del Trabucador (una playa cuasi rectilínea de arena con un perfil transversal barrado). Los casos medidos durante la campaña Delta'93 se dividieron en 12 tests a lo ancho de la zona de rompientes (Rodríguez *et al.*, 2001), de las cuales se han seleccionado las de mayor energía de oleaje. Cada prueba consistió en un conjunto de series temporales de 20 minutos de duración. Las series de datos de oleaje dentro de la zona de rompientes fueron medidas mediante un sensor de contacto *Etrometa* de 5 cm de resolución a 4 Hz que permite obtener niveles medios, alturas y período del oleaje; las velocidades fueron medidas mediante 6 correntímetros electromagnéticos (CEM) 2D *Delft P-s* con una frecuencia de muestreo de 20 Hz, una resolución de $\pm 2,5$ cm/s (1% del fondo de escala) distribuidos en una helicoide vertical en las cotas a 10, 20, 30, 40, 60 y 80 cm del fondo. Las principales condiciones hidrodinámicas de los 8 tests seleccionados se resumen en la tabla 5.27.

Tests	X (m)	h (m)	T_p (s)	Q (°)	$H_{1/3}$ (m)
5	39.9	1.29	7.11	104.6	0.71
6	25.2	0.80	8.00	102.6	0.55
7	17.1	0.69	8.00	101.0	0.46
8	45.5	1.34	7.11	109.5	0.61
9	31.8	0.70	7.11	-	0.58
10	26.0	0.69	7.11	103.9	0.47
11	21.5	0.60	8.00	101.6	0.41
12	12.0	0.38	8.00	101.3	0.27
Costa	0.0	0.00	-	-	0.00

Tabla 5.27.- Condiciones hidrodinámicas de los experimentos seleccionados (X: coordenada perpendicular a la costa; h : profundidad media; T_p : período del pico espectral del oleaje irregular; Θ : ángulo entre las olas y la corriente longitudinal medido con los CEM; $H_{1/3}$: altura de ola media del tercio superior de la serie).

5.5.2.- Análisis de Resultados

Para analizar la fricción con el fondo en caso de olas y corrientes combinadas existen diversas aproximaciones. Una de mejores (de acuerdo al ejercicio de intercomparación de Soulsby *et al.* (1993) por considerar la interacción no lineal entre olas y corrientes, resolviendo la ecuación de cantidad de movimiento en la escala del flujo oscilatorio), es el modelo de capa límite oscilatoria presentado por Fredsøe (1984). La integración en el tiempo de este tipo de modelos conduce a un perfil doble logarítmico para las corrientes cuando son afectadas por las olas y a un logaritmo clásico para el caso de corrientes puras. Aplicando un modelo de este tipo a la componente longitudinal de la corriente, dentro de la capa límite inferior CWBL (que se obtiene promediando la capa límite oscilatoria), el perfil de velocidades puede expresarse como:

$$v(z) = \left(\frac{u_*}{\kappa} \right) \log \left(\frac{30z}{k_n} \right) \quad \text{para } z < z_b \quad [5.42]$$

donde k es la constante de von Karman (0.41), u_* es la velocidad de fricción dentro de la CWBL, k_n es la altura de rugosidad equivalente de Nikuradse y z_b es el límite superior de la CWBL, cuyo grosor se representa por δ_{wc} . En la capa superior, fuera de la capa límite, el perfil se expresa como:

$$v(z) = \left(\frac{u_{*wc}}{k} \right) \log \left(\frac{30z}{k_w} \right) \quad \text{para } z > z_b \quad [5.43]$$

donde la velocidad de corte u_{*wc} se incrementa al igual que la altura de rugosidad k_w , por efecto de la interacción del flujo oscilatorio (olas) con el flujo medio (corriente) dentro de δ_{wc} . Es importante recalcar que durante los experimentos Delta'93, no se obtuvieron series de velocidades dentro de la capa límite del fondo CWBL, debido a que su espesor aproximado δ_{wc} , es entre el 5 y 10 % de la profundidad h , (Rodríguez *et al.* 1991). En ninguno de los casos medidos, esta distancia resulta menor o igual a 10 cm, que es la distancia al fondo del correntímetro inferior. Por esta razón, el ajuste de la distribución vertical de la corriente longitudinal, así como la estimación de u_{*wc} y k_w se realiza con la ecuación [5.43].

Tal como se indicó anteriormente, parece claro que en hidrodinámica costera, la definición de “corrientes” no es trivial debido a la existencia de múltiples escalas temporales que van desde olas, varios tipos de ondas largas, mareas, etc. En este apartado, los valores experimentales de las corrientes se han obtenido promediando las velocidades en dos intervalos de tiempo distintos:

- Promediado de 20 minutos, que corresponde a la media de toda la serie (representadas por V).
- Promediado de 5 minutos, correspondiente a las 40 olas más energéticas durante el test (representadas por v). Este subintervalo se seleccionó como el período de ocurrencia de oleaje irregular de mayor energía (o altura) dentro de la serie total de 20 minutos.

En 7 de los 8 tests analizados se han ajustado los perfiles logarítmicos respectivos para obtener las velocidades de corte u^*_{wc} , alturas de rugosidad K_w y coeficientes de fricción respectivos. El test 12, no se incluyó, pues estaba ya muy próximo a la costa, en la zona de swash, donde el trineo se encontraba sumergido intermitentemente con lo cual no se dispuso de suficientes puntos en la vertical al haber adoptado un mínimo de tres puntos por perfil (de forma de disponer como mínimo de 1 grado de libertad en los ajustes por regresión lineal). En los tests restantes se han eliminado los puntos superiores al nivel de senos de las olas en los cuales los correntímetros quedaron intermitentemente fuera del agua. Los valores de la corriente longitudinal $v(x, z)$ se ilustran en la figura 5.77 y la tabla 5.28.

Con los valores de $v(z)$ (5 min) y $V(z)$ (20 min) se ajustaron por mínimos cuadrados los perfiles de velocidad logarítmicos [5.43] obteniéndose los valores experimentales respectivos de u^*_{wc} (a partir de la pendiente de la recta de ajuste) y k_w (a partir de la ordenada al origen). Estos valores experimentales se han utilizado para estimar los coeficientes de fricción de las corrientes (f_c) y de las corrientes en presencia del oleaje (f_{wc}) y compararlos con formulaciones empíricas y/o teóricas. En la figura 5.78 puede verse el ajuste para el test 8. Los valores obtenidos a partir de $V(z)$ se presentan en la tabla 5.29.

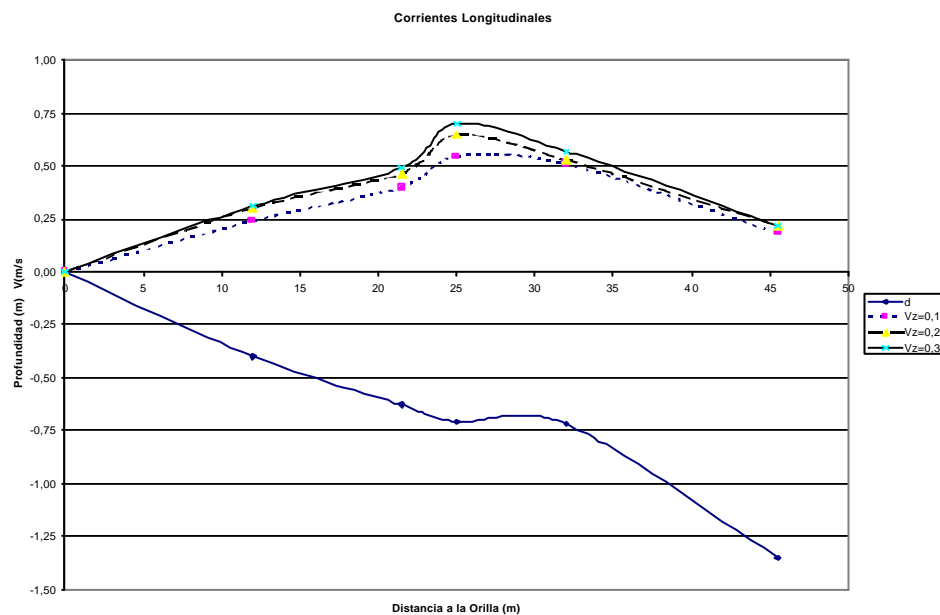


Figura 5.77.- Distribución perpendicular a la costa de las corrientes longitudinales $v(x, z)$ a 0.1, 0.2 y 0.3 m del fondo. En la figura es posible distinguir la presencia de una barra sumergida. Es interesante notar que el máximo de la velocidad longitudinal se da en el seno de la barra (test 10).

Test	$z = 10\text{cm}$	$z = 20\text{cm}$	$z = 30\text{cm}$	$z = 40\text{cm}$	$z = 60\text{cm}$	$z = 80\text{cm}$
5	0.52	0.56	0.58	0.63	*	*
6	0.76	0.775	0.84	0.90	*	*
7	0.65	0.665	0.71	0.78	*	*
8	0.185	0.215	0.215	0.24	0.235	0.255
9	0.51	0.53	0.57	*	*	*
10	0.545	0.645	0.70	*	*	*
11	0.40	0.465	0.49	0.51	*	*

*: valores decrecientes por estar el CEM sobre el nivel de senos de algunas olas.

Tabla 5.28.- Corriente Longitudinal $v(z)$ [m/s] medida en las “subseries” de 5 minutos de mayor oleaje.

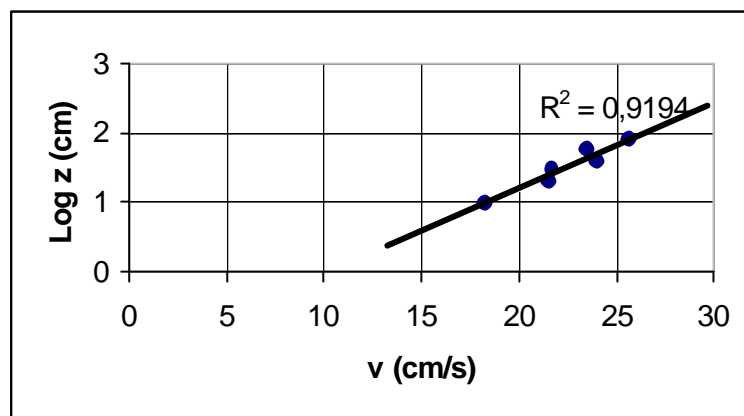


Figura 5.78.- Ajuste logarítmico de la corriente longitudinal $v(z)$ para el test 8 (fuera de la CWBL).

Test	$\text{Log } z'_0$	z'_0 (cm)	$k_w=30z'_0$ (cm)	k / u_{*wc}	u_{*wc} (cm/s)	Coef.Corr.	Grad.Lib.
5	-1.8368	0.015	0.44	0.055	7.4	0.96	2
6	-1.6798	0.021	0.63	0.037	11.1	0.91	2
7	-1.4459	0.036	1.07	0.039	10.3	0.89	2
8	-1.2626	0.055	1.64	0.123	3.3	0.96	4
9	-2.8718	0.001	0.04	0.076	5.3	0.985	1
10	-0.6726	0.212	6.40	0.031	13.4	0.999	1
11	-1.1867	0.065	1.95	0.054	7.5	0.99	2

Valores Experimentales según: $\text{Log}(z) = k u_{*wc} V(z) + \text{Log}(z'_0)$

Tabla 5.29.- Alturas de rugosidad equivalente K_w y velocidades de fricción u_{*wc} para los tests 5 - 11 obtenidas mediante ajustes logarítmicos de $V(z)$.

Es importante señalar que, si bien los coeficientes de correlación obtenidos son bastante altos (entre 0.89 y 0.999) se debe ser cauto en la interpretación de los resultados debido a que los grados de libertad son reducidos (como se puede observar en la tabla 5.29), y a la alta sensibilidad en la determinación de z'_0 ($k_w/30$). A partir de los valores de u_{*wc}

obtenidos, se ha calculado para cada test la componente longitudinal de la tensión de corte τ_b , en el fondo a partir de expresión:

$$\frac{\tau_b}{\rho} = u_{*wc}^2 \quad [5.44]$$

donde ρ es la densidad del agua. Los coeficientes de fricción f_{wc} y f_c se obtienen a partir de su relación con las tensiones de corte (Nielsen, 1992) como:

$$\frac{\tau_b}{\rho} = \frac{1}{2} f_{wc} u_{orb} V(z_b) \quad [5.45]a$$

$$\frac{\tau_b}{\rho} = \frac{1}{2} f_c [U^2(z_b) + V^2(z_b)]^{0.5} V(z_b) \quad [5.45]b$$

donde el coeficiente f_{wc} puede relacionarse con el oleaje a partir de:

$$f_{wc} = \exp \left[5.5 \left(\frac{k_n}{A_{bm}} \right)^{0.2} - 6.6 \right] \quad [5.46]$$

donde A_{bm} es la amplitud del movimiento oscilatorio $A_{bm} = (u_{orb}/\omega)$ cerca del fondo; U y V representan las corrientes cerca del fondo. La velocidad orbital cerca del fondo u_{orb} se ha calculado con los valores de la altura de ola significativa (obtenida estadísticamente), y para las corrientes se han escogido tanto las componentes medias en 5 minutos (u , v) como los valores medios en 20 minutos (U , V) del correntímetro electromagnético inferior localizado a 10 cm del fondo. Así, combinando las ecuaciones [5.44] y [5.45]a,b se obtiene que:

$$f_{wc} = 2 \frac{u_{*wc}^2}{(u_{orb} V(z_b))} \quad [5.47]$$

y

$$f_c = 2 \frac{u_{*wc}^2}{[U^2(z_b) + V^2(z_b)]^{0.5} V(z_b)} \quad [5.48]$$

donde los valores de u_{*wc} se obtuvieron como las pendientes en los ajustes logarítmicos de los perfiles de los dos tipos de velocidades medias (V y v) para los 7 tests analizados.

Los valores experimentales obtenidos del coeficiente de fricción, f_{wc} , se han comparado con las predicciones de fórmulas empíricas, como se verá mas adelante.

Por otra parte, los valores experimentales obtenidos para el coeficiente de fricción, f_c , se han comparado con las predicciones “teórico-numéricas” del modelo de capa límite para olas y corrientes convenientemente parametrizado (ver Sánchez Arcilla *et al.* 1992). Este modelo supone que si el espesor de la capa límite CWBL (δ_{wc}) es pequeño comparado con la profundidad h , el coeficiente de fricción es:

$$f_c = \frac{2k}{\ln\left(\frac{30h}{k_w} - 1\right)} \quad [5.49]$$

donde la rugosidad equivalente k_w se obtiene mediante la ecuación:

$$\frac{k_w}{k_n} = \left(\frac{30\delta_{wc}}{k_n}\right)^{\left(1 - \frac{u_*}{u_{*wc}}\right)} \quad [5.50]$$

quedando así resuelto el modelo de capa límite mencionado.

Tal como era de esperar, se ha observado que ambos coeficientes de fricción f_{wc} y f_c son altamente sensibles a los valores de rugosidad k_n que se utilice en su evaluación. En ambientes naturales, con oleaje irregular, la altura de la rugosidad del fondo puede estimarse (e.g. Nielsen, 1992; Raudkivi, 1988) mediante tres tipos de aproximaciones diferentes:

- i. Debida a las características del sedimento: k_{n1}

$$k_{n1} = 2.5 d_{50} \quad [5.51]$$

- ii. Debida a la geometría de las formas de fondo (por ejemplo los ripples): k_{n2}

$$k_{n2} = 16 \frac{\gamma^2}{\lambda} + 0.16 u_{orb}^{2.25} \quad [5.52]$$

- iii. Debida a las formas de fondo y al efecto de la transferencia de *momentum* como mecanismo de transporte de fondo de sedimentos: k_{n3} , que según Wilson (1989) puede expresarse como:

$$k_{n3} = 8 \frac{H_r^2}{L_r} + 5\theta'_{2.5} d_{50} \quad [5.53]$$

donde

$$\frac{H_r}{A_{bm}} = 21\psi^{-1.25} \quad [5.54]$$

$$\frac{H_r}{A_{bm}} = \exp \left[\frac{639 - 0.3(\ln \psi)^8}{1000 + 0.75(\ln \psi)^7} \right] \quad [5.55]$$

$$\theta'_{2.5} = 0.5 \frac{f_{2.5}}{\psi} \quad [5.56]$$

donde d_{50} es el tamaño medio de grano, A_{bm} es amplitud del movimiento orbital, H_r y L_r corresponden respectivamente a la altura y separación entre *ripples*, u_{orbm} es la velocidad orbital máxima y $\theta'_{2.5}$ es el parámetro “de grano” de Shields, $f_{2.5}$ se obtiene utilizando k_{n1} (ecuación [5.46]) y ψ es el número de movilidad $u_{orbm}^2 / s g d$, siendo s la densidad relativa adimensional de los sedimentos.

Como se mencionó anteriormente, la cuantificación del coeficiente de fricción f_{wc} (ecuación [5.46]) depende en gran medida del valor que se asuma para k_n . Los valores calculados en base a una rugosidad “de grano” (k_{n1} en función de $d_{50} \approx 0.2$ mm), subestiman en un orden de magnitud los valores experimentales obtenidos en la mayoría de las pruebas, para las dos escalas temporales seleccionadas de 5 y 20 minutos. Los resultados de las comparaciones de los coeficientes de fricción experimentales f_{wc} y f_c y los teóricos f_{wcT} y f_{cT} se resumen en la tabla 5.30.

Test	5	6	7	8	9	10	11
Valores Experimentales							
$f_{wc} = 2 \frac{u_{*wc}^2}{(u_{orb} V)}$	0.02440	0.02840	0.03320	0.04470	0.0112	0.09000	0.03930
$f_{wc} = 2 \frac{u_{*wc}^2}{(u_{orb} V)}$	0.03444	0.01177	0.02179	0.02033	0.01136	0.06377	0.05771
$f_c = 2 \frac{u_{*wc}^2}{[u^2 + v^2]^{0.5} v}$	0.03827	0.02828	0.03632	0.05912	0.01909	0.11045	0.06583
$f_c = 2 \frac{u_{*wc}^2}{[U^2 + V^2]^{0.5} V}$	0.06663	0.01095	0.02556	0.06015	0.01796	0.08099	0.10648
Valores Teóricos							
$f_{wcT} \Rightarrow$ ecs. [5.46] y [5.51] $K_N = K_{N1}$	0.00653	0.00660	0.00653	0.00708	0.00626	0.00681	0.00656
$f_{wcT} \Rightarrow$ ecs. [5.46] y [5.52] $K_N = K_{N2}$	0.06637	0.06303	0.05456	0.05127	0.07598	0.05721	0.05398
$f_{wcT} \Rightarrow$ ecs. [5.46] y [5.53] $K_N = K_{N3}$	0.00882	0.00892	0.00882	0.01309	0.00873	0.00929	0.00888
$f_{cT} \Rightarrow$ ecs. [5.49] y [5.50] $K_N = K_{N1}$	0.00492	0.00426	0.00470	0.00591	0.00524	0.00477	0.00548
$f_{cT} \Rightarrow$ ecs. [5.49] y [5.50] $K_N = K_{N2}$	0.02189	0.01967	0.02104	0.01963	0.03171	0.02059	0.02501
$f_{cT} \Rightarrow$ ecs. [5.49] y [5.50] $K_N = K_{N3}$	0.00609	0.00534	0.00591	0.00752	0.00678	0.00600	0.00690
Coeficientes de fricción f_{wc} y f_c a través de la zona de rompientes. K_N = altura de rugosidad total, K_{N1} = rugosidad de grano, K_{N2} = rugosidad con formas de fondo fijas y K_{N3} = rugosidad con formas de fondo y transporte de sedimentos							

Tabla 5.30.- Valores experimentales y teóricos de los coeficientes de fricción f_{wc} y f_c . Puede observarse que las predicciones de f_{wc} y f_c mejoran sustancialmente si se estima K_N mediante las expresiones [5.51]-[5.56] que consideran la fricción adicional por formas de fondo y el transporte de sedimentos.

Los valores experimentales de u_{*wc} y k_w obtenidos anteriormente han sido comparados con los predichos por el modelo de capa límite parametrizado. Como parámetros de entrada se utilizaron valores medidos de T , h , Θ_{wc} (ángulo entre olas y corrientes longitudinales), $u_{orb1/3}$ para cada test y las rugosidades k_{ni} obtenidas mediante las ecuaciones [5.51] - [5.56] acopladas al modelo de capa límite obtenido. Estos resultados se presentan en las tablas 5.31, 5.32 y 5.33 para los tests seleccionados, variando el tipo de rugosidad (de grano, con formas de fondo y con transporte de sedimentos).

Valores Teóricos	5	6	7	8	9	10	11
K_w [cm]	0.4	0.1	0.15	0.75	0.25	0.15	0.25
d_{wc}/h (%)	1.6	3.1	3.5	1.0	3.6	3.0	3.5
u^* [cm/s]	1.9	3.8	2.8	0.8	2.7	2.6	2.0
u^*_{wc} [cm/s]	2.5	4.2	3.2	1.3	3.4	3.0	2.5
Simulación de $V(z)$ mediante el modelo de capa límite ($w+c$) parametrizado, $K_N = K_{N1}$ (ec. [5.51]) considerando únicamente el efecto de los granos de sedimentos.							

Tabla 5.31.- Cálculo mediante modelo de capa límite de los valores teóricos de K_w , d_{wc}/d , u^* y u^*_{wc} considerando rugosidad de grano.

Valores Teóricos	5	6	7	8	9	10	11
K_w [cm]	27.8	14.5	13.7	23.1	29.1	13.1	16.6
d_{wc}/h (%)	5.2	9.0	10.1	3.0	12.8	8.5	10.3
u^* [cm/s]	3.6	7.9	5.9	1.3	6.6	5.2	4.1
u^*_{wc} [cm/s]	5.3	8.9	6.9	2.4	8.4	6.3	5.3
Simulación de $V(z)$ mediante el modelo de capa límite ($w+c$) parametrizado, $K_N = K_{N2}$ (ec. [5.52]) considerando formas de fondo fijas.							

Tabla 5.32.- Cálculo mediante modelo de capa límite de los valores teóricos de K_w , d_{wc}/d , u^* y u^*_{wc} considerando formas de fondo fijas.

Valores Teóricos	5	6	7	8	9	10	11
K_w [cm]	0.8	0.3	0.3	1.8	0.65	0.4	0.6
d_{wc}/h (%)	2	3.5	3.5	1	4	3.5	4
u^* [cm/s]	2.1	4.2	4.2	0.9	3.1	2.9	2.2
u^*_{wc} [cm/s]	2.8	4.7	4.7	1.5	3.9	3.4	2.8
Simulación de $V(z)$ mediante el modelo de capa límite ($w+c$) parametrizado, $K_N = K_{N3}$ (ec. [5.53]) considerando formas de fondo y transporte de sedimentos.							

Tabla 5.33.- Cálculo mediante modelo de capa límite de los valores teóricos de K_w , d_{wc}/d , u^* y u^*_{wc} considerando formas de fondo móviles.

Analizando la distribución transversal de k_w y u^*_{wc} dentro de la zona de rompientes, se puede observar que los valores de la rugosidad del fondo obtenidos a partir del ajuste logarítmico del perfil de velocidades tienen una dispersión muy alta a lo largo de la zona de rompientes, con valores que van desde 0.04 a 6.4 cm, siendo los valores más altos los que están en las inmediaciones de la barra, justo después de la rompiente. Esto no es de extrañar, puesto que los valores más altos son en los puntos donde se encuentran las corrientes longitudinales más intensas. La misma dispersión de resultados puede apreciarse (figura 5.79) con respecto a las predicciones teóricas, que dependiendo de la expresión utilizada -es decir, si se considera que el fondo es suave (ecuación [5.51]), que tiene formas de fondo (ecuación [5.52]) o en el que hay un cierto transporte de sedimentos (ecuación [5.53])- el valor de la rugosidad del fondo puede diferir hasta en un orden de magnitud (con un máximo calculado de 29.1 cm con la ecuación [5.52] vs. 0.04 cm estimados a partir del perfil de velocidades para el test 9).

Analizando con detalle las predicciones de la rugosidad del fondo (figura 5.79), puede apreciarse que en las predicciones teóricas de las ecuaciones [5.51] y [5.53] hay una misma tendencia, aunque se considera que es esta última la que mejores resultados ofrece, puesto que es más realista considerar la influencia del transporte de sedimentos que únicamente la rugosidad del grano (propia de ambientes hidrodinámicamente muy suaves). Con respecto a la rugosidad estimada con la ecuación [5.52], donde ésta depende únicamente de la presencia de formas de fondo, el valor resultante se sobreestima (con respecto a los valores experimentales y las otras dos predicciones) en un orden de magnitud.

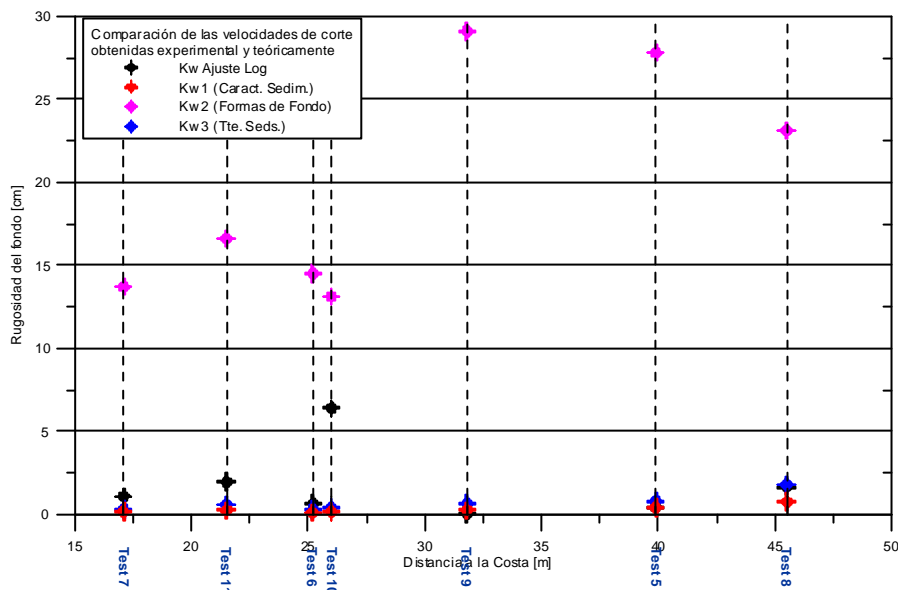


Figura 5.79.- Valores experimentales vs. teóricos de la rugosidad del fondo (ver tablas 5.31, 5.32 y 5.33). Nótese los valores sobreestimados de la ecuación [5.52].

Observando con mas detalle (figura 5.80) las predicciones de las ecuaciones [5.51] y [5.53], es posible observar que ambas predicciones siguen la misma tendencia y aún cuando los valores son similares, se considera que el uso de la ecuación [5.53] es mas apropiado, puesto que la zona de rompientes es un ambiente hidrodinámicamente intenso en el que con toda probabilidad se llevó a cabo un cierto transporte de sedimentos. La utilización de la ecuación [5.51] implica aceptar que se trata de un fondo suave, sin formas de fondo, en el que la rugosidad solo depende del tamaño de grano.

Con respecto a los resultados de las velocidades de corte, estas presentan una menor dispersión de resultados que los que se observan para la rugosidad del fondo (figura 5.81) y que el mejor estimador es el que considera rugosidades calculadas con la ecuación [5.52] (considerando la presencia de formas de fondo), el cual da los valores mas próximos a los obtenidos experimentalmente a partir del ajuste logarítmico (con excepción del test 9).

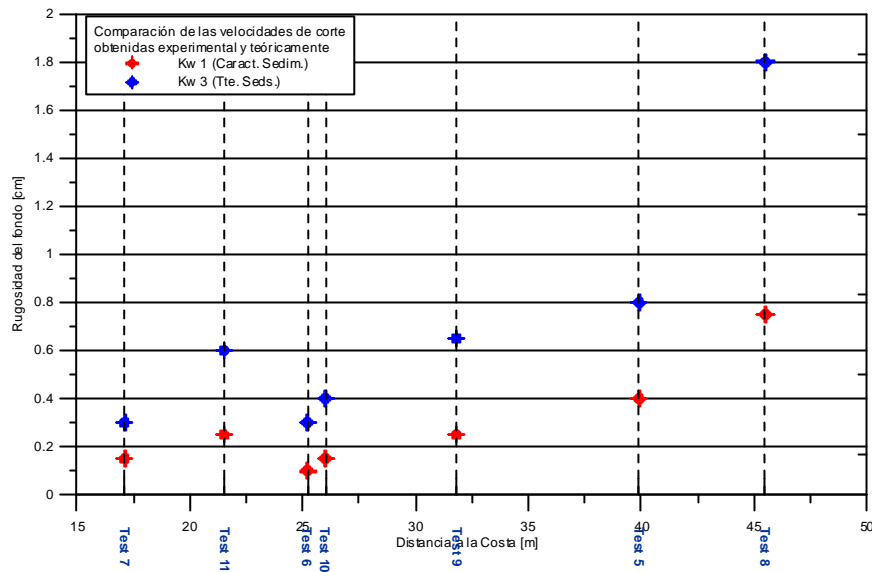


Figura 5.80.- Valores teóricos de la rugosidad del fondo calculados a partir de las ecuaciones [5.51] y [5.53].

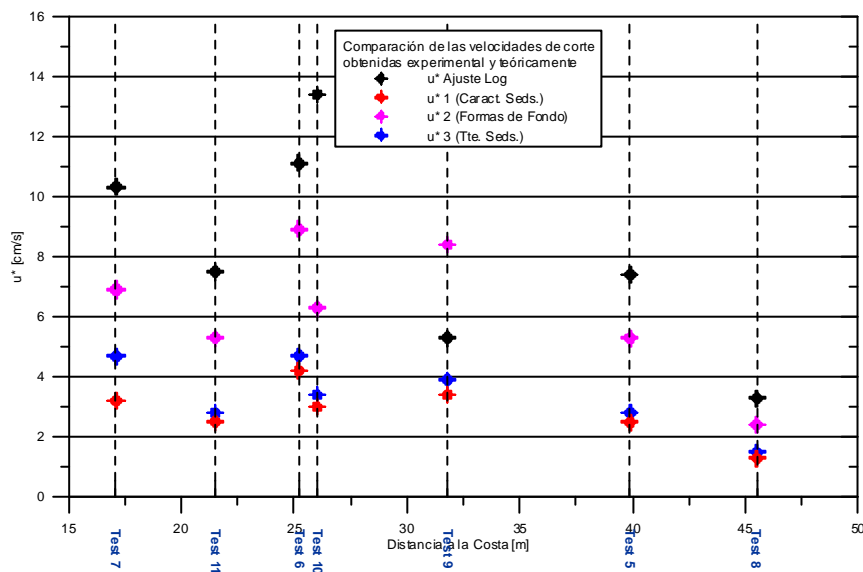


Figura 5.81.- Valores experimentales vs. teóricos de la velocidad de corte (ver tablas 5.31, 5.32 y 5.33).

5.6.- Evolución batimétrica a corto término en la Barra del Trabucador (Delta del Ebro) en condiciones de baja energía

En el capítulo 2 se ha señalado la importancia que tiene para el ser humano la zona costera y la necesidad de preservar la integridad de sus playas. De aquí que uno de los mayores retos en la Ingeniería Marítima y las Ciencias del Mar está en prevenir su degradación. Para abordar estos problemas, es necesario conocer y describir en detalle y de manera cuantitativa las condiciones hidrodinámicas de la zona costera y su impacto en la línea de costa y evolución batimétrica.

Como se ha señalado en el capítulo 4, en 1993 y 1996, en el marco de un proyecto de la CICYT y del proyecto europeo FANS respectivamente, se llevaron a cabo dos campañas de medidas (hidrodinámicas y morfodinámicas) en la barra del Trabucador (Delta del Ebro). Las medidas consistieron en diversos levantamientos topográficos y batimétricos, la obtención de datos meteorológicos, el registro del oleaje a diversas profundidades, la adquisición de series temporales de velocidades de la corriente en varios puntos de la columna de agua dentro de la zona de rompientes y la filmación con cámaras de video.

En este apartado se analizan las variaciones batimétricas y los mecanismos impulsores de las mismas que fueron registradas durante las campañas de 1993 y 1996 en la barra del Trabucador. En particular, se analizan los mecanismos hidrodinámicos que se produjeron durante ambas campañas, tanto dentro de la zona de rompientes (trineo) como fuera (boyas), centrándose en los días de mayor energía del oleaje. Luego se realiza el estudio de los cambios batimétricos producidos, comparando perfiles topográficos tomados al inicio y al final de las campañas, y viendo las diferencias entre ambos. Finalmente se exponen las conclusiones a las que todo este análisis ha conducido.

5.6.1.- Análisis de la hidrodinámica durante las campañas Delta'93 y Delta'96

A continuación se presenta una breve descripción de los principales mecanismos impulsores de la dinámica de la zona cercana a la costa medida durante las campañas realizadas por el LIM-UPC.

5.6.1.1.- Delta'93

En la campaña Delta '93 se realizaron 12 tests, de los cuales, 4 se llevaron a cabo el día 15 de diciembre y 8 mas el día 16 de diciembre. En este apartado se analizan los ocho tests correspondientes al 16 de diciembre de 1993 (tabla 5.34), día en que se presentó el oleaje de mayor energía.

TEST	MES	DÍA	HORA(GMT)
12161004	12	16	10:04
12161055	12	16	10:55
12161205	12	16	12:05
12161407	12	16	14:07
12161507	12	16	15:07
12161546	12	16	15:46
12161620	12	16	16:20
12161651	12	16	16:51

Tabla 5.34.- Tests realizados el 16 de diciembre de 1993.

5.6.1.1.1.- Características del viento

Además de las observaciones directas en la playa durante los experimentos, se dispuso de información sobre intensidad y dirección del viento en tres estaciones meteorológicas en el área del Delta del Ebro: “Deltebre”, “Sant Carles” y “l’Ametlla de Mar”. De las observaciones directas en la barra del Trabucador se obtuvo información cualitativa sobre la intensidad y dirección dominante del viento. La dirección dominante fue SE (Garbí) y la intensidad fue siempre muy baja. Los datos cuantitativos pertenecen a las tres estaciones ya mencionadas. No obstante, la fiabilidad de los datos medidos durante esta campaña es baja (no había mantenimiento de estas estaciones), por lo que los datos son de una utilidad relativa. En la estación de “Deltebre” el mantenimiento era escaso; en el caso de la estación de “Sant Carles” (figura 5.82), las series presentaron extrañas discontinuidades e irregularidades; y la de “l’Ametlla de Mar” no se consideró representativa por estar muy alejada de la barra del Trabucador (más de 20 Km.) y estar potencialmente afectada por la orografía de la zona.



Figura 5.82.- Delta del Ebro. Situación de la playa del Trabucador y Sant Carles de la Rápita.

No obstante estas circunstancias, se ha considerado que la estación de Sant Carles es la más apropiada para caracterizar las condiciones atmosféricas acusadas durante la campaña Delta'93 (figuras 5.83 y 5.84)

Los datos analizados son la dirección y la intensidad del viento para el día 16 de diciembre. Las series tienen una resolución de 10 minutos y cada dato es el valor medio en el mismo intervalo. Las velocidades medias (figura 5.83) fueron menores de 3.5 m/s y con rachas cortas (menores a dos horas). La dirección sufrió variaciones pero durante el periodo de mayor intensidad, a primera hora de la tarde, fue predominantemente SW.

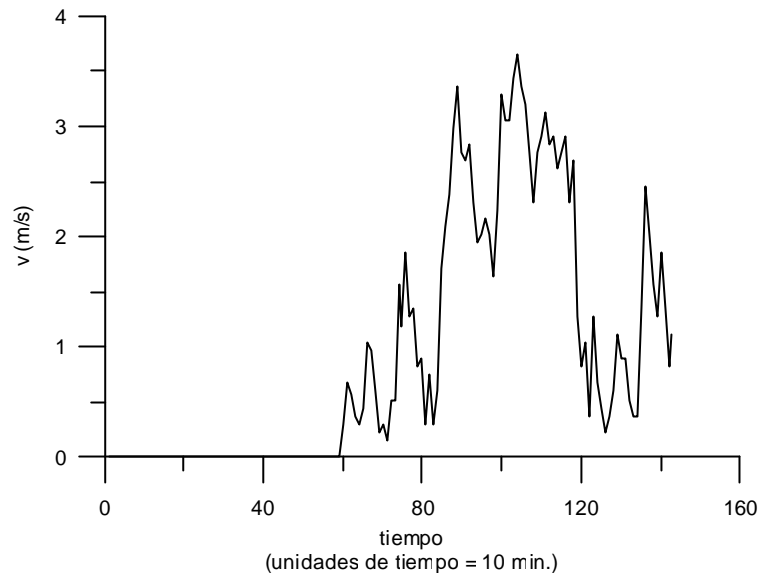


Figura 5.83.- Velocidad del viento en la estación de “Sant Carles” el día 16 de diciembre de 1993.

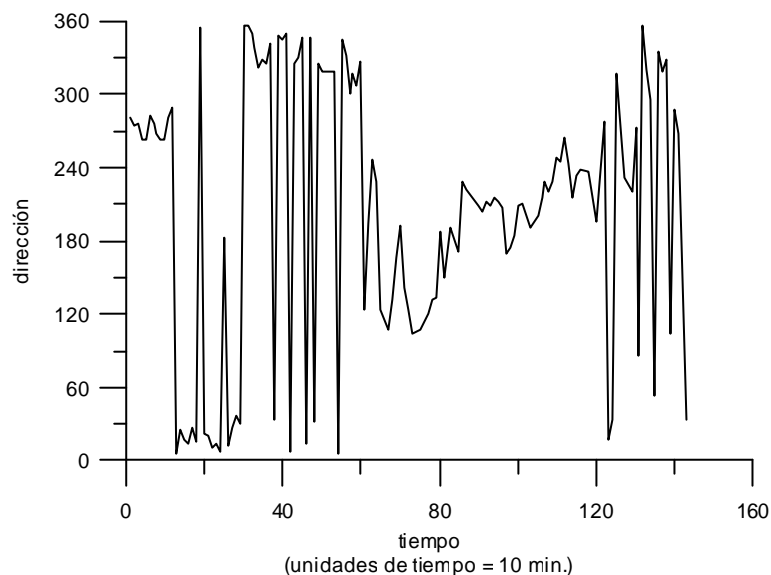


Figura 5.84.- Dirección del viento en la estación de “Sant Carles” el día 16 de diciembre de 1993.

5.6.1.1.2.- Características del oleaje en la boya

Para medir el oleaje fuera de la zona de rompientes se dispuso de dos boyas direccionales (DWR-1 y DWR-2). La boya DWR-2 fue colocada a 7.5 m. de profundidad (aproximadamente a 1500 m. de la costa) frente a la barra del Trabucador, mientras que la DWR-1 estuvo colocada a 50 m. de profundidad frente a Cap Tortosa (ver figura 5.82). Se han analizado únicamente los datos obtenidos en la boya DWR-2 por su mayor proximidad al área de estudio. Los datos obtenidos de esta boya son series temporales de altura, dirección y periodo asociados al oleaje incidente. El muestreo se graba cada tres horas, donde cada dato corresponde al promedio de 20 minutos. Como se dispuso de mediciones de la boya cada tres horas y del trineo a intervalos menores,

ha sido necesario interpolar los valores de H_s , T_p y ángulo θ de la boya para que coincidan con las coordenadas temporales correspondientes a las mediciones del trineo. Se ha asumido que las condiciones medidas en la boya equivalen temporalmente a las correspondientes a la zona de rompientes ya que el tiempo medio de propagación del oleaje desde la boya hasta la orilla es aproximadamente de 4 minutos. La altura de ola significativa H_s (ver figura 5.85) alcanzó un máximo de 86 cm por la mañana, manteniéndose con valores superiores a los 80 cm hasta el mediodía. Durante la tarde la altura de ola fue descendiendo progresivamente hasta llegar a su mínimo en el último test realizado, siendo inferior a los 60 cm. El periodo de pico T_p (figura 5.86) osciló alrededor de los 6 segundos, mientras que la dispersión media en la dirección del oleaje incidente fue de 15° (figura 5.87), presentando una alta incidencia oblicua procedente del S (aproximadamente 178° del N, lo que equivale a 36° de la línea de orilla).

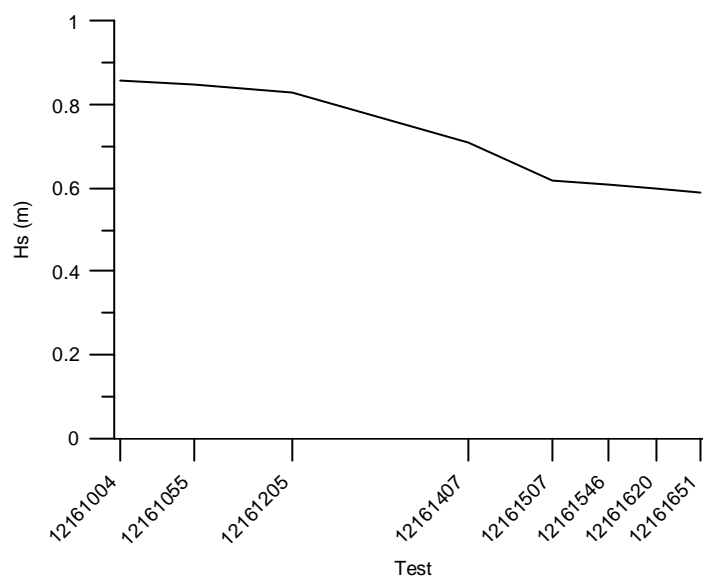


Figura 5.85.-Altura de ola significativa H_s en la boya DWR-2.

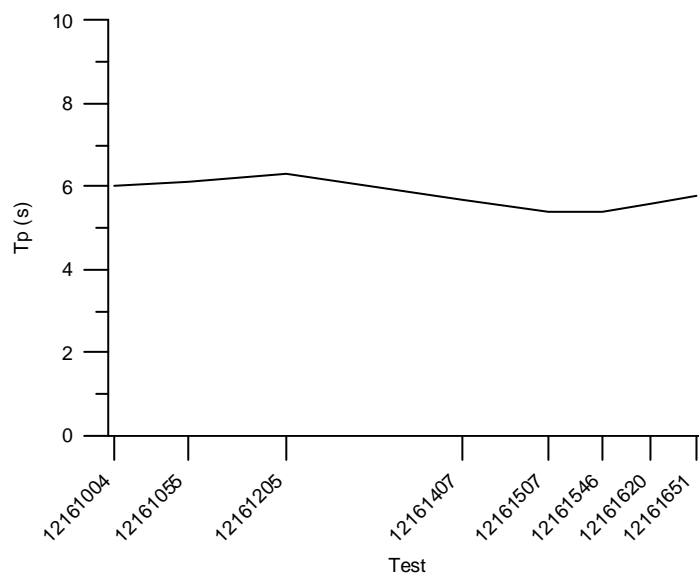


Figura 5.86.- Periodo de pico T_p en la boya DWR-2.

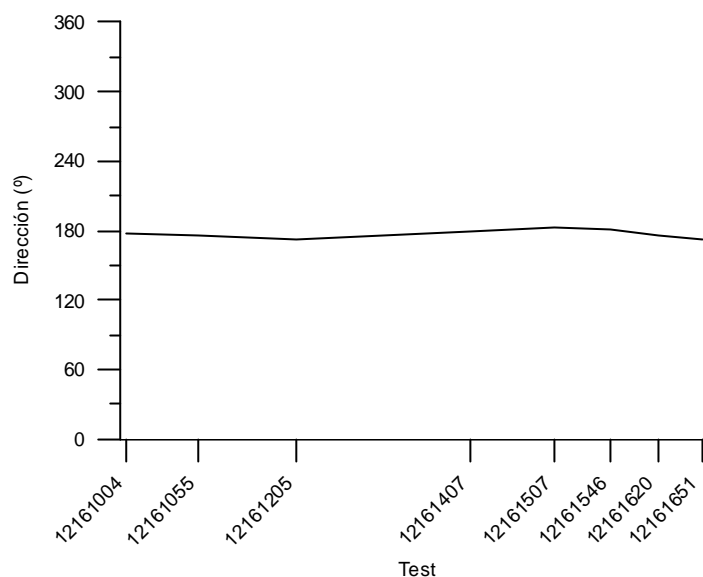


Figura 5.87.- Dirección del oleaje en la boya DWR-2.

5.6.1.1.3.- Características del oleaje y velocidades en el trineo

Como se ha mencionado a lo largo de este capítulo, las medidas dentro de la zona de rompientes se obtuvieron mediante un trineo en el que se colocó diverso instrumental como un sensor de altura (de contacto) de ola, seis correntímetros electromagnéticos, un compás digital y un prisma óptico.

La posición horizontal del trineo se obtuvo mediante el uso del prisma óptico montado en una barra vertical, donde también se encontraban los correntímetros, y una estación total con distanciómetro infrarrojo, lo cual asegura una gran precisión en la determinación de la posición del trineo. Las posiciones iniciales del trineo para los 8 tests del 16 de diciembre pueden verse en la figura 5.88, donde se observa que mientras en y (eje transversal a la costa) se cubrió una distancia cercana a 40 m en x (eje longitudinal a la costa) se abarcó poco más de 10 m realizándose, aproximadamente, los cinco últimos tests en un mismo tramo transversal a la costa.

La variación de la superficie libre se midió con el sensor de alturas colocado en la misma barra vertical que el prisma óptico y los correntímetros, con una precisión de 5 cm y una frecuencia de muestreo de 4 Hz. La longitud de las series temporales fue de 20 minutos (4800 datos) y 40 minutos (9600 datos), con lo que se cubrió un número de olas suficiente como para considerar representativo este oleaje. A partir de estas medidas se ha obtenido la profundidad media, la altura de ola significativa H_s , el periodo de pico T_p , y el periodo medio T_z .

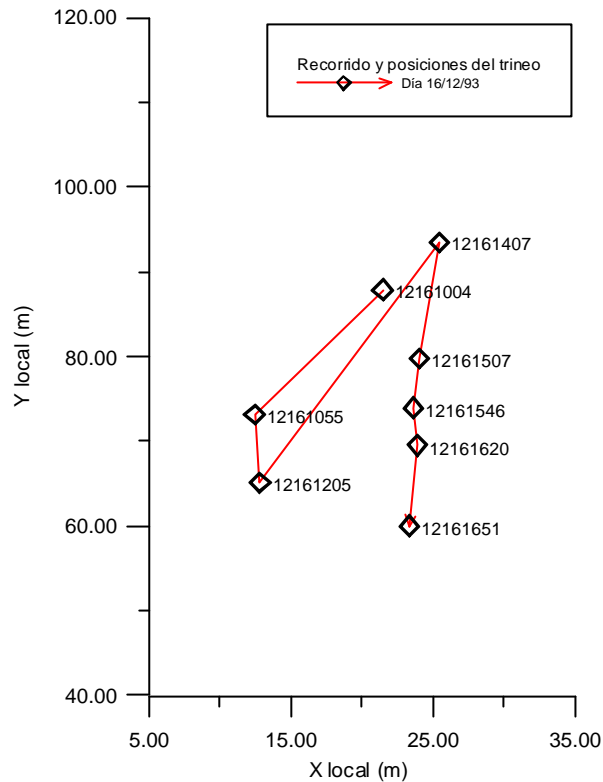


Figura 5.88.- Posiciones del trineo en la zona de rompientes durante Delta'93. El eje x local paralelo a la costa y el eje y local perpendicular a la misma.

La profundidad media (figura 5.89) se ha obtenido como el promedio temporal de las señales del sensor de oleaje (a los que se ha sumado 27 cm, que es la distancia comprendida entre el sensor y el pie del trineo). Las dos profundidades mayores, superiores a 1.2 m, se han dado para los tests 12161004 y 12161407, los realizados a mayor distancia de la costa (ver figura 5.88).

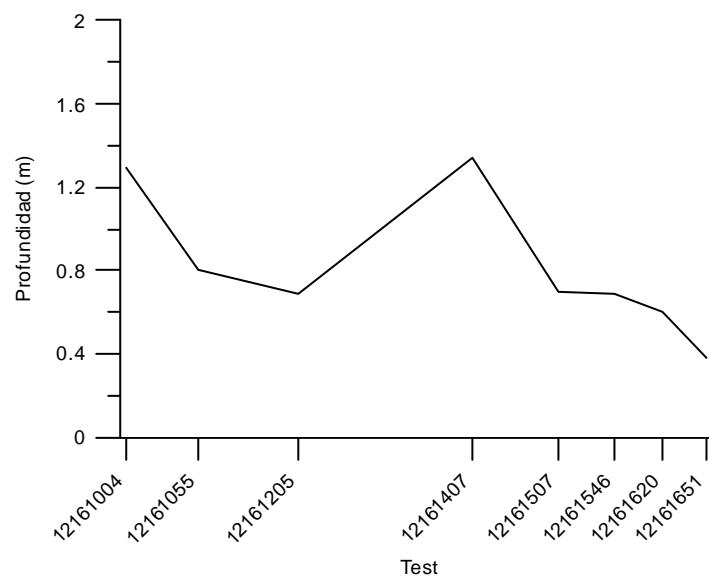


Figura 5.89.- Profundidad medida de los tests realizados durante Delta'93.

A partir de los niveles de cresta y valle de las olas se ha obtenido la altura de ola significativa H_s (figura 5.90) como el promedio de las alturas correspondientes al tercio superior de las olas más altas del registro. El máximo ($H_s = 0.71$ m) se alcanzó en el primer test. Durante la tarde se produjo un descenso de la altura de ola hasta llegar a su mínimo en el último test con una $H_s = 0.27$ m. El rango de variación fue de 44 cm.

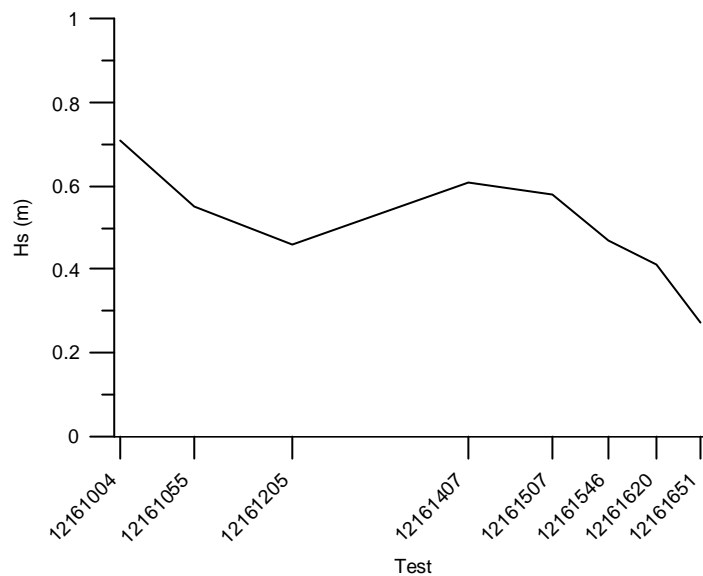


Figura 5.90.- Altura de ola significativa H_s en el trineo.

En la figura 5.91 se ha representado el periodo de pico T_p (correspondiente al pico del espectro de energía de cada serie de niveles) y en la figura 5.92 el periodo medio T_z .

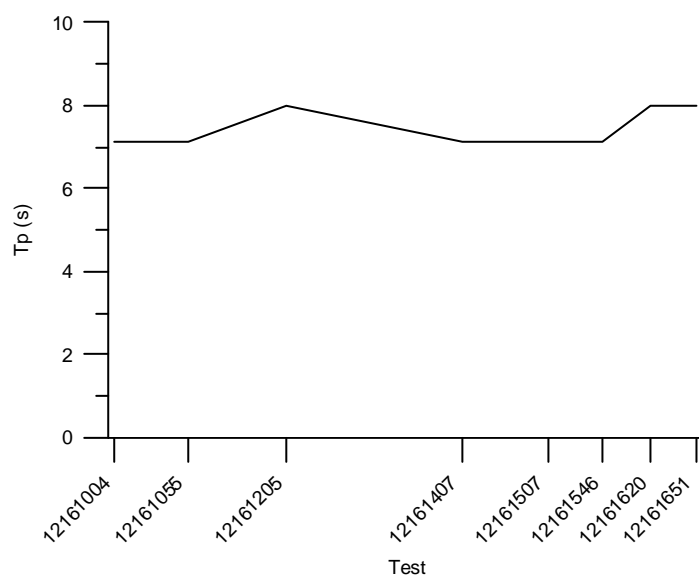


Figura 5.91.- Periodo de pico T_p en el trineo.

El periodo de pico fue superior a 6 segundos pero nunca llegó a superar los 8 segundos. El periodo medio estuvo en torno a los 2.2 segundos.

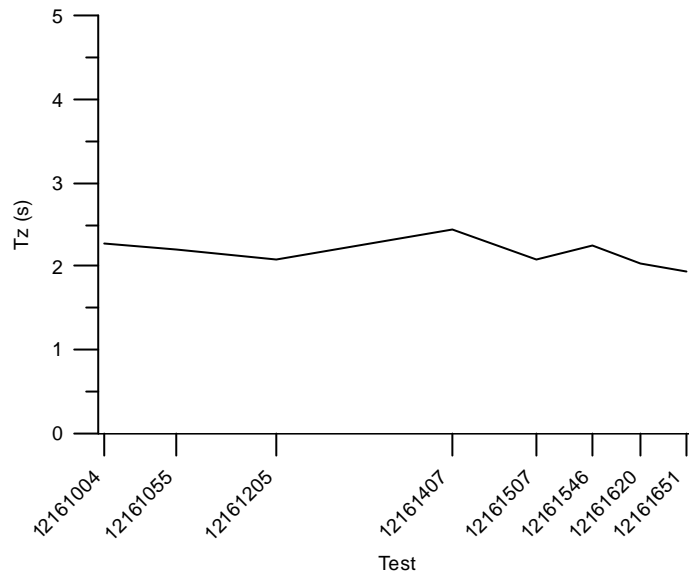


Figura 5.92.- Periodo medio T_z en el trineo.

La orientación del trineo se midió mediante un compás digital con un error de 0.3 grados y una frecuencia de un dato por minuto. La orientación de los correntímetros se obtuvo haciendo coincidir sus ejes x - y con los del trineo con un error cercano a los ± 2 grados.

La dirección del oleaje (figura 5.93) medida con los correntímetros procede mayoritariamente del SE, oscilando alrededor de los 135 grados respecto al N (79 grados respecto a la orilla). Puede observarse que la oblicuidad del oleaje se ha reducido respecto a la incidencia medida en la boya DWR-2 (figura 5.87) situada fuera de la zona de rompientes, evidenciando la refracción que experimenta el oleaje conforme se acerca a la costa.

Simultáneamente a los datos obtenidos con el sensor de oleaje, se obtuvieron las series de velocidad con los 6 correntímetros electromagnéticos bidimensionales situados en la barra vertical del trineo a 10, 20, 30, 40, 60 y 80 cm del fondo. La frecuencia de muestreo fue de 20 Hz y la longitud de las series temporales osciló, igual que las series del sensor de oleaje, entre 20 minutos (24000 datos) y 40 minutos (48000 datos). El rango máximo de velocidades medido fue de ± 2.5 m/s con un error del 1% (2.5 cm/s). Las series de velocidad obtenidas con los correntímetros fueron corregidas por el efecto de rotaciones sufridas por el trineo durante las mediciones, y por las alineaciones diferentes entre las distintas posiciones del trineo en cada prueba. Para esto se rotaron las velocidades de los correntímetros proyectando los ejes del trineo al sistema x - y local mediante los ángulos diferenciales medidos con el compás. Después se proyectó a un sistema de referencia invariante de componentes Norte y Este, para finalmente ser las velocidades proyectadas en componentes paralela u y perpendicular v a la costa, tal como indica la figura 5.94.

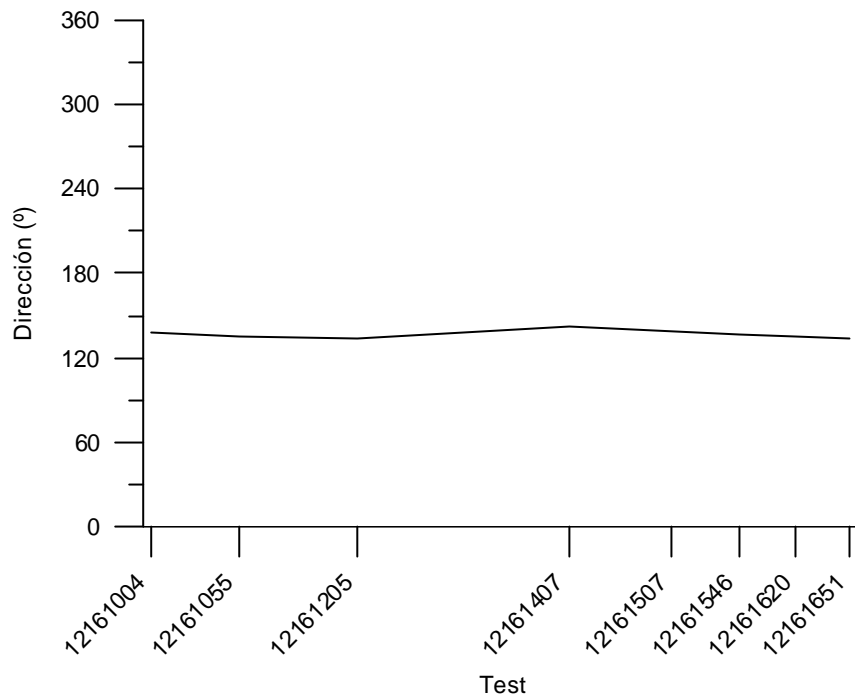


Figura 5.93.- Dirección del oleaje en el trineo.

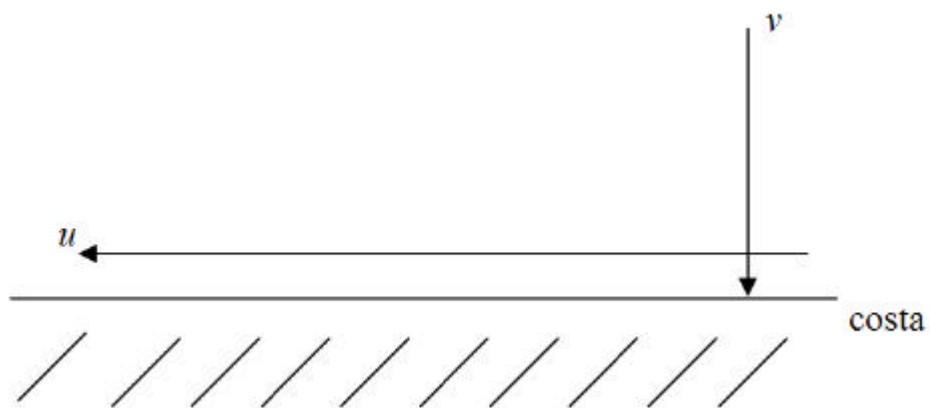


Figura 5.94.- Direcciones de las velocidades en la barra del Trabucador.

A partir de las velocidades longitudinal u y transversal v a la costa se han obtenido los intervalos de 5 minutos con mayor altura de ola media cuadrática H_{rms} de las series temporales de 20 y 40 minutos. De esta forma puede hallarse el periodo más energético de cada serie temporal. Una vez obtenidos dichos periodos de 5 minutos se han promediado las velocidades u (6000 datos) y las v (6000 datos) para ser representadas en las figuras 5.95 a 5.101.

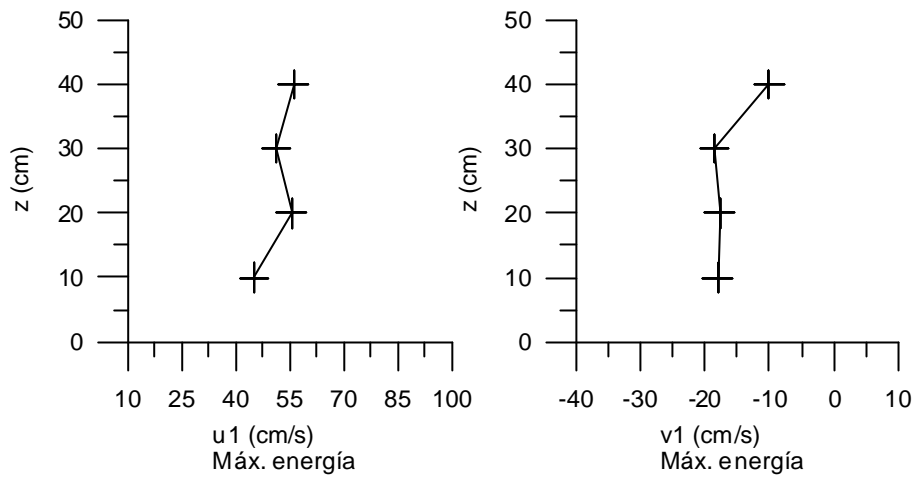


Figura 5.95.- Velocidades longitudinal ($u1$) y transversal ($v1$) a la costa medidas en el trineo durante el periodo de máxima energía del test 12161004.

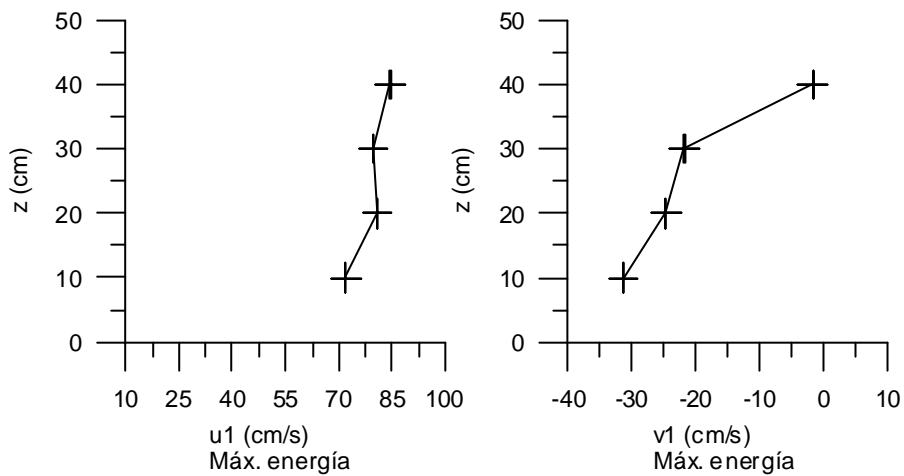


Figura 5.96.- Velocidades longitudinal ($u1$) y transversal ($v1$) a la costa medidas en el trineo durante el periodo de máxima energía del test 12161055.

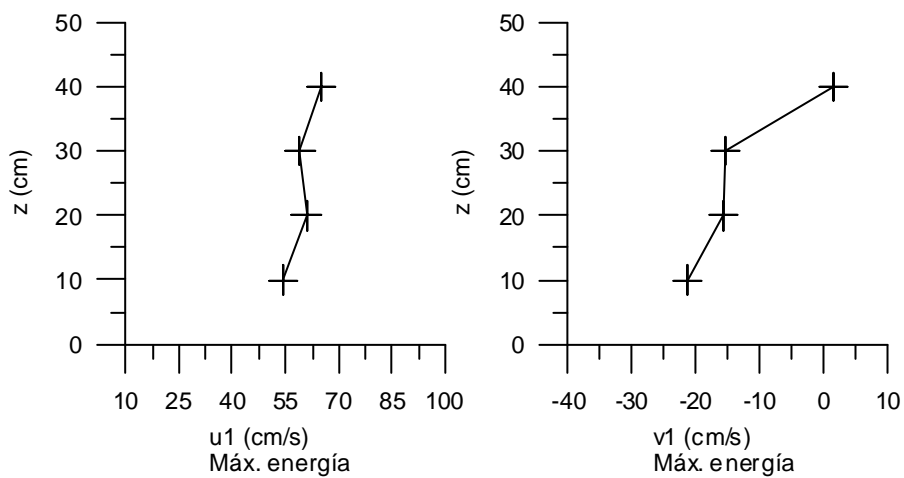


Figura 5.97.- Velocidades longitudinal ($u1$) y transversal ($v1$) a la costa medidas en el trineo durante el periodo de máxima energía del test 12161205.

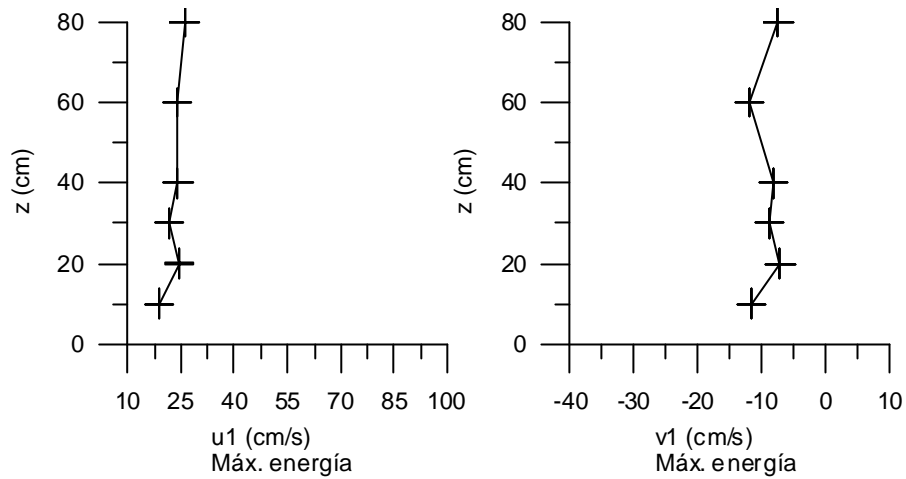


Figura 5.98.- Velocidades longitudinal (u_1) y transversal (v_1) a la costa medidas en el trineo durante el periodo de máxima energía del test 12161407.

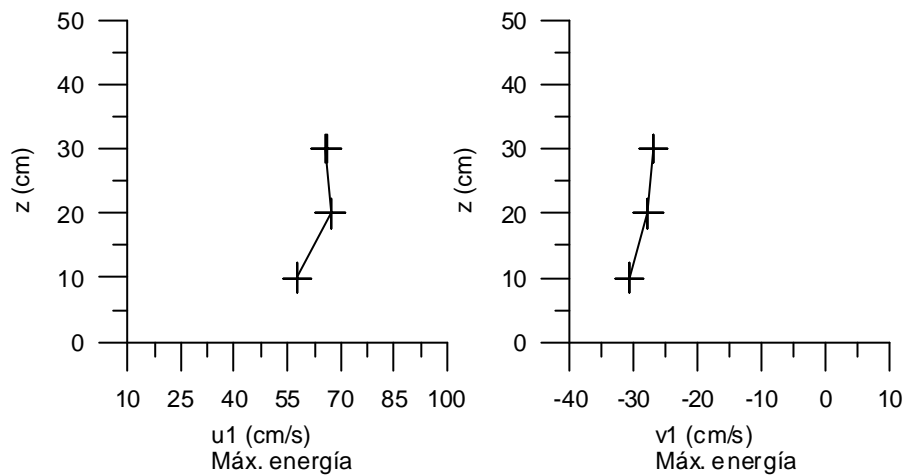


Figura 5.99.- Velocidades longitudinal (u_1) y transversal (v_1) a la costa medidas en el trineo durante el periodo de máxima energía del test 12161507.

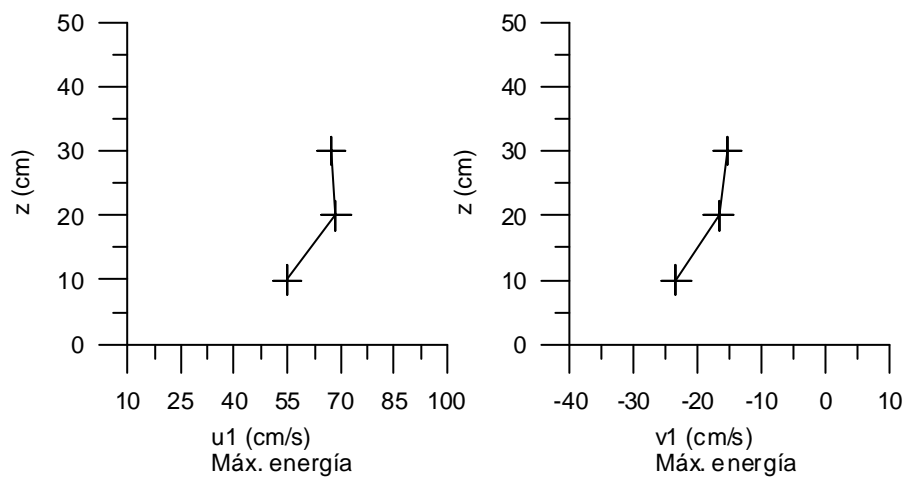


Figura 5.100.- Velocidades longitudinal (u_1) y transversal (v_1) a la costa medidas en el trineo durante el periodo de máxima energía del test 12161546.

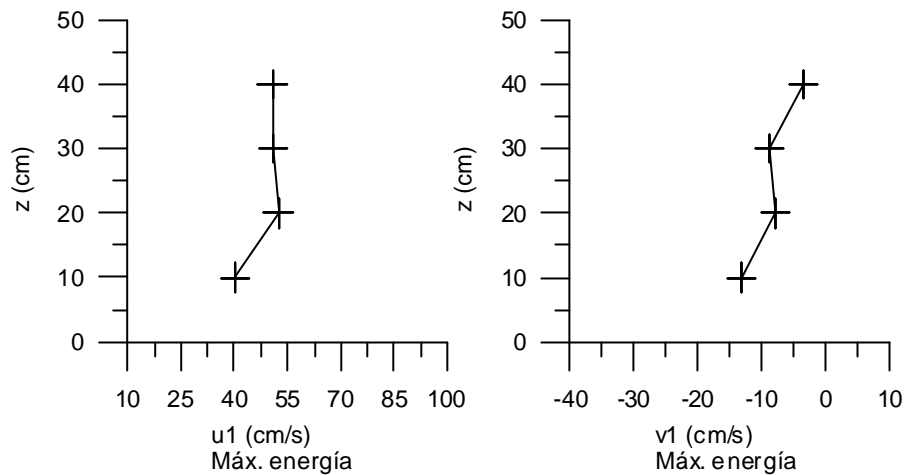


Figura 5.101.- Velocidades longitudinal ($u1$) y transversal ($v1$) a la costa medidas en el trineo durante el periodo de máxima energía del test 12161620.

En este análisis (figuras 5.95 a 5.101) se han eliminado los valores de velocidad de los correntímetros en la parte superior de la columna de agua que hayan quedado alternativamente fuera del agua por suministrar datos erróneos. Así, el último test (12161651) no se ha representado por haberse encontrado la mayoría de correntímetros sobre el nivel de senos de las olas, debido a que se llevo a cabo cerca de la zona de swash.

La velocidades longitudinales u fueron siempre en sentido hacia el norte (positivas), mientras que las transversales v a la costa fueron mayoritariamente en sentido *offshore* (negativas), exceptuando el caso 12161205 (figura 5.97) donde se han obtenido en el correntímetro más cercano a la superficie velocidades transversales ligeramente mayores de cero, es decir, en sentido a la costa.

La mayor velocidad longitudinal medida se alcanzó en el test 12161055 (figura 5.96) llegando a velocidades cercanas a los 90 cm/s. En el test 12161407 (figura 5.98) se midió la velocidad longitudinal de menor magnitud, cercana a los 17 cm/s. Por su parte, La velocidad transversal en sentido *offshore* fue de casi 35 cm/s durante el test 12161055 (figura 5.96) en el correntímetro situado más próximo al fondo. En la mayoría de casos la velocidad transversal se ha ido reduciendo conforme disminuía la distancia a la superficie. El orden de magnitud de las velocidades longitudinales obtenidas ha sido en la mayoría de casos más del doble de las velocidades transversales. Esto indica que las corrientes longitudinales fueron bastante más fuertes que las corrientes transversales a la costa.

5.6.1.2.- Delta'96

Los experimentos Delta'96 han permitido la obtención de un amplio conjunto de datos distribuidos en 45 tests (a diferencia de los 12 realizados en Delta'93). Se han escogido para su análisis los experimentos correspondientes al día 5 de noviembre del 1996, ya que son los de mayor interés por presentarse ese día las condiciones de oleaje y viento más intensas registradas durante todo el experimento. En la tabla 5.35 se han presentado

los tests realizados ese día y el significado de la numeración seguida (durante el primer test del día no se obtuvieron datos de oleaje).

TEST	DÍA	Nº TEST	HORA(GMT)
05021149	05	02	11:49
05031230	05	03	12:30
05041312	05	04	13:12
05051634	05	05	16:34
05062153	05	06	21:53
05072242	05	07	22:42
05082315	05	08	23:15
05092350	05	09	23:50

Tabla 5.35.- Tests realizados el 5 de noviembre de 1996.

5.6.1.2.1.- Características del viento

Durante toda la campaña el viento fue medianamente intenso distribuido en forma de brisas diarias. Se han analizado los datos obtenidos el día 5 de noviembre en la estación meteorológica localizada en una torre de observación a unos 800 m del área de estudio y a 10 m de altura, aproximadamente, sobre el nivel del mar (figura 4.8 Capítulo 4). La frecuencia de muestreo de datos fue de un dato cada 10 minutos. Ese día se presentaron situaciones de viento intensas entre las 10 y las 14 horas, registrándose valores de velocidad (a 10 metros sobre el nivel del mar) superiores a los 10 m/s e incluso alcanzando (alrededor de las 11 horas) los 12m/s (ver figura 5.104). A partir del mediodía la intensidad del viento fue disminuyendo y durante la tarde y la noche del día 5 no se superaron los 5 m/s. La presión atmosférica (figura 5.103) fue baja hasta el mediodía pero luego no dejó de ascender durante la tarde-noche y la dirección del viento (figura 5.104) fue prácticamente constante y procedente del N-NO, con una incidencia que osciló en torno a los 330° respecto el norte.

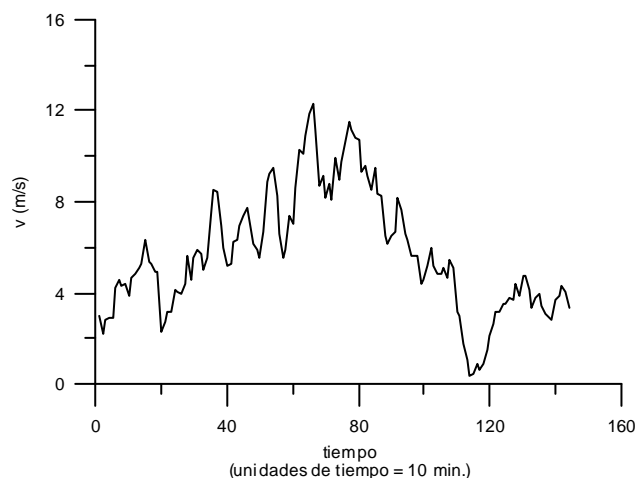


Figura 5.102.- Velocidad el viento en la estación meteorológica a 10 m de altura sobre el nivel del mar.

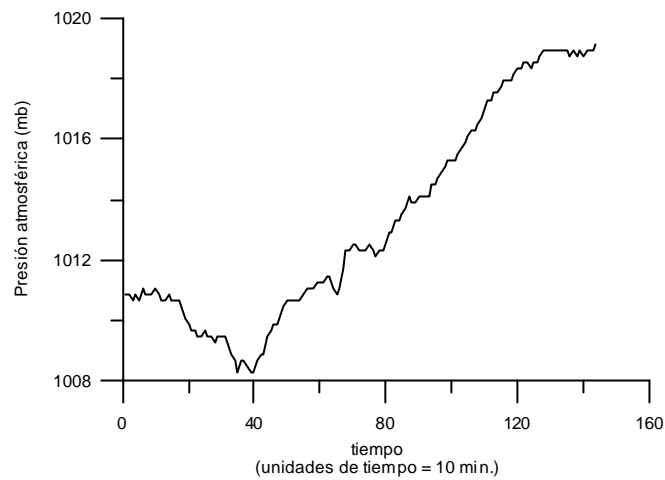


Figura 5.103.- Presión atmosférica en la estación meteorológica a 10 m de altura sobre el nivel del mar.

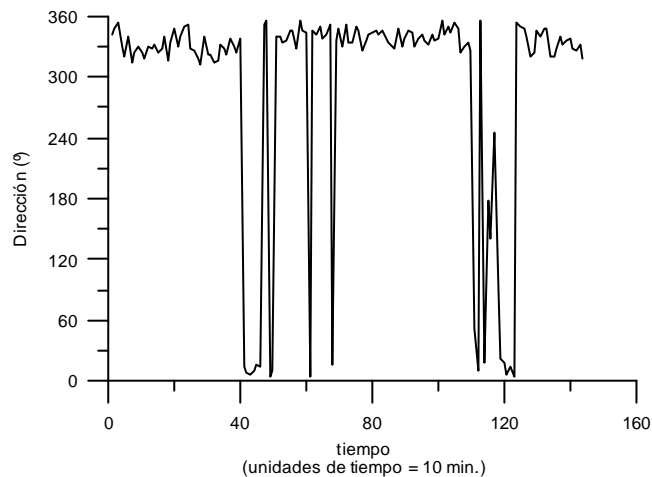


Figura 5.104.- Dirección del viento en la estación meteorológica a 10 m de altura sobre el nivel del mar.

5.6.1.2.2.- Características del oleaje en la boya

A diferencia de la campaña Delta'93, no existen datos de la boya del Trabucador (DWR-2) durante los experimentos Delta'96. Por ello, se han analizado los datos obtenidos con la boya de Cap Tortosa (DWR-1). Esta boya direccional ha proporcionado medidas del oleaje en alta mar (a 50 m de profundidad) en registro continuo.

La altura de ola significativa H_s (figura 5.105) ha tenido un rango de variación de casi 90 cm, alcanzando valores de H_s cercanos a 1 m a las 6 horas y a las 24 horas del día 5. A primera hora de la tarde también se midieron alturas de ola altas, en torno a los 0.7 m. De 9 a 12 horas de la mañana la altura de ola fue mínima, próxima a los 10 cm.

En la figura 5.106 se ha representado el periodo de pico T_p cuya oscilación máxima fue de 4 segundos y se produjo en forma descendente entre las 3 horas y las 18 horas del día, hora en la cual se obtuvo el mínimo ($T_p = 3s$), y de forma ascendente, más rápidamente, entre las 18 y 24 horas. El periodo máximo fue de 7.1 segundos.

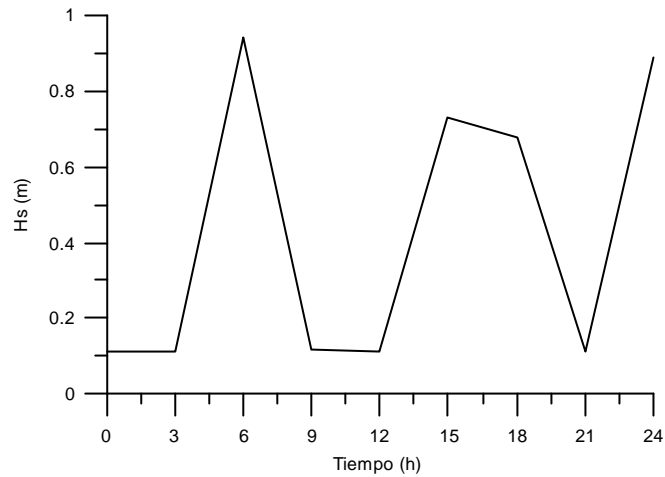


Figura 5.105.-Altura de ola significativa H_s registrada en la boya DWR-1 (Cap Tortosa)

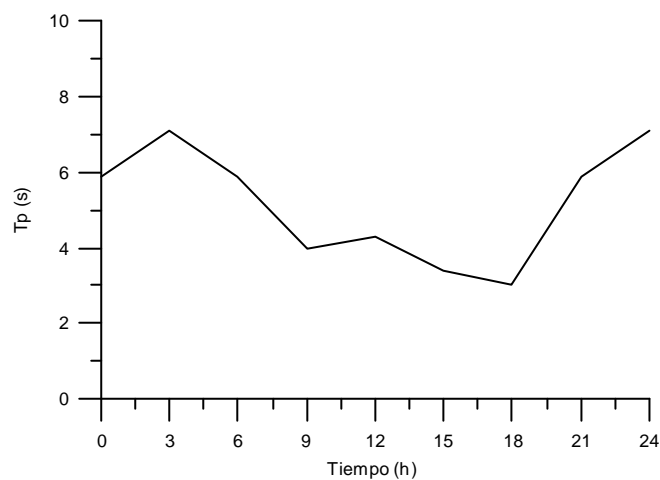


Figura 5.106.- Periodo de pico T_p registrado en la boya DWR-1 (Cap Tortosa).

La dirección del oleaje incidente (figura 5.107) fue durante la mayor parte del día (desde las 9 horas hasta las 15 horas), del NW (330° respecto al N). Posteriormente, varió un poco el ángulo de incidencia y fue del N (0°). Durante la noche la dirección cambió a E-NE, aproximadamente 80° respecto al N.

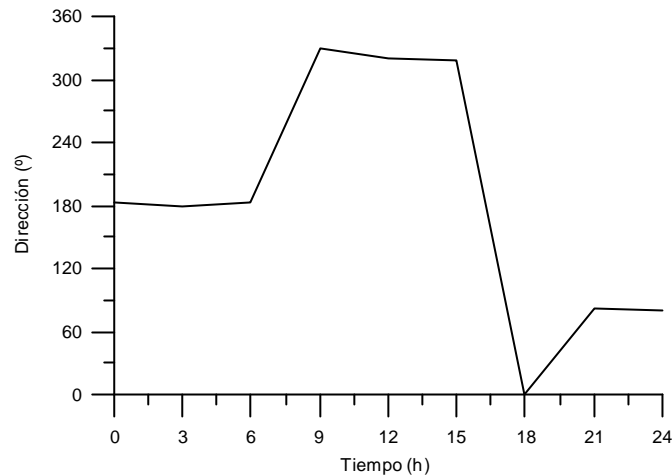


Figura 5.107.- Dirección del oleaje registrada en la boya DWR-1 (Cap Tortosa).

5.6.1.2.3.- Características del oleaje y velocidades en el trineo

En la campaña Delta'96 se volvió a utilizar el mismo sistema móvil de medición (trineo) que en la campaña Delta'93.

En la figura 5.108 se han representado las posiciones iniciales y finales del trineo a lo largo del recorrido seguido por el mismo durante los tests 05021149, 05031230, 05041312 y 05051634. De los tests restantes no se tienen datos referentes a las posiciones del trineo (ya que se realizaron de noche y el equipo topográfico no estaba en disposición de ser utilizado aunque es de suponer que la posición es cercana a la del test 05051634). Los ejes x e y locales son paralelo y perpendicular a la costa, respectivamente. Los cuatro tests representados están localizados aproximadamente en un mismo tramo transversal a la costa, abarcando una distancia de unos 30 metros. Tanto la distancia entre la posición inicial y final, sobre los 2 metros, como la dirección seguida por el trineo entre dichas posiciones es similar para los cuatro tests.

La profundidad media, la altura de ola significativa H_s , el periodo de pico T_p , y el periodo medio T_z se han obtenido a partir de los datos del sensor de oleaje, de igual forma que en la campaña Delta'93. En este caso la longitud de las series temporales fue de 30 minutos (7200 datos, ya que la frecuencia de muestreo fue de 4 Hz) para todas los tests (a diferencia de Delta'93 donde oscilaron entre 20 y 40 minutos).

Para obtener la profundidad media (figura 5.109) se ha tenido que sumar al promedio temporal de los registros del sensor de oleaje, los 4 cm de distancia que había entre dicho sensor y el pie del trineo. Se puede observar como para los tres primeros tests representados la profundidad media apenas varía ya que se realizaron en posiciones próximas, mientras en el test 05051634, que se llevo a cabo en una posición bastante más distante de la costa, hay un aumento de la profundidad hasta llegar a cerca de 1.5 m. Esta profundidad se mantuvo en los tests restantes.

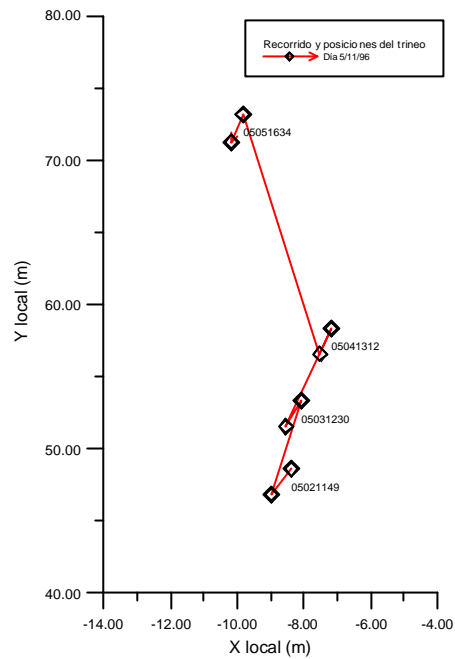


Figura 5.108.- Recorrido y posiciones del trineo, siendo el eje x local paralelo a la costa y el eje y local perpendicular a la misma.

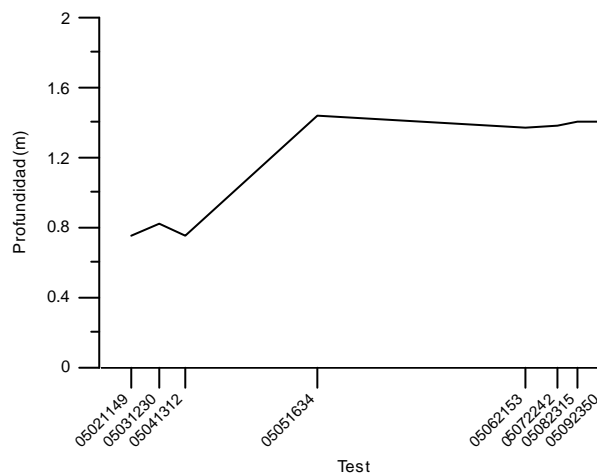


Figura 5.109.- Profundidad medida en el trineo.

El rango de variación que se ha producido en la altura de ola significativa H_s (figura 5.110) fue de 42 cm. El valor mínimo se produjo para el test 05051634 con una altura de ola de 0.21 m, mientras que el máximo se alcanzó en el experimento 05072242 con una $H_s = 0.63$ m.

En la figura 5.111 se ha representado el periodo de pico T_p y en la figura 5.112 el periodo medio T_z . El periodo de pico fue inferior en los cuatro primeros tests donde osciló en torno a los 6 segundos, sin embargo, en los cuatro últimos tests aumentó superando los 8 segundos. El periodo medio registró una variación similar, rondando los 2.2 segundos los cuatro primeros tests, mientras que los cuatro últimos estuvieron cerca de los 3 segundos.

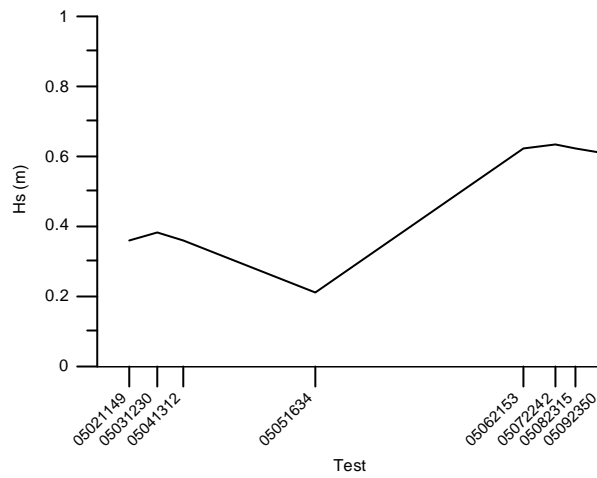


Figura 5.110.- Altura de ola significativa H_s en el trineo.

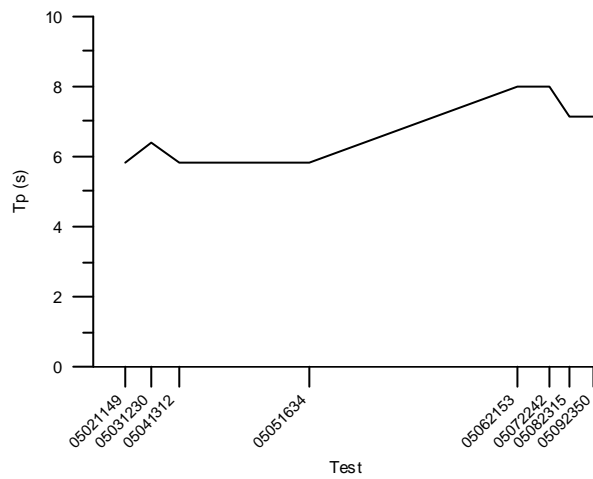


Figura 5.111.- Periodo de pico T_p en el trineo.

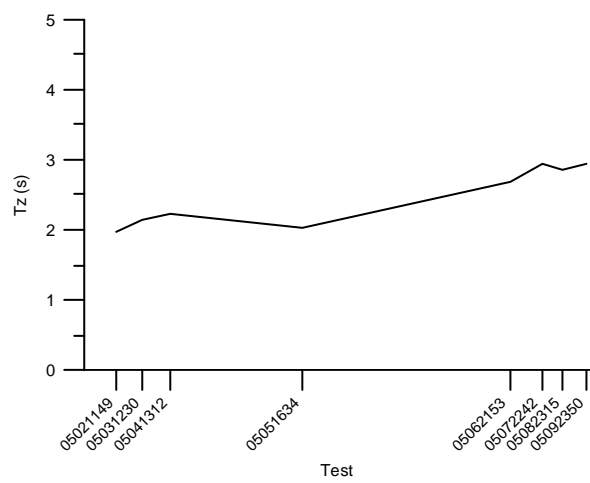


Figura 5.112.- Periodo medio T_z en el trineo.

Analizando la dirección del oleaje (figura 5.113) para los tests 05021149, 05031230, 05041312 y 05051634, se puede observar que para los cuatro tests la dirección del oleaje incidente procede del ESE oscilando ligeramente alrededor de los 110 grados respecto al N (76 grados respecto la orilla). Esta dirección difiere bastante de la obtenida en la boya direccional durante el mismo periodo de tiempo (NW). El motivo de esta diferencia puede deberse a que la barra del Trabucador está en una zona abrigada si el oleaje viene del norte. La boya DWR-1 se encuentra en alta mar frente a Cap Tortosa mientras que el trineo se encuentra dentro de la zona de rompientes. Podría ser que a la costa no llegase todo el oleaje que mide la boya. Habría que disponer de los espectros direccionales del oleaje en la boya, para determinar si éstos son bimodales y existe un oleaje secundario, que una vez refractado, es el que llega hasta el trineo.

Para obtener datos de las velocidades en la columna de agua se utilizaron, al igual que en los experimentos Delta'93, los correntímetros electromagnéticos, pero esta vez fueron dispuestos verticalmente a 5, 10, 25, 65 y 100 cm del fondo. También se proyectaron las velocidades en las direcciones paralela (velocidad longitudinal u) y perpendicular (velocidad transversal v) a la costa (ver figura 5.94). Durante 30 minutos se han medido las velocidades longitudinales u y transversales v a la costa, con una frecuencia de muestreo de 20 Hz. Así cada serie completa ha contenido 36000 datos.

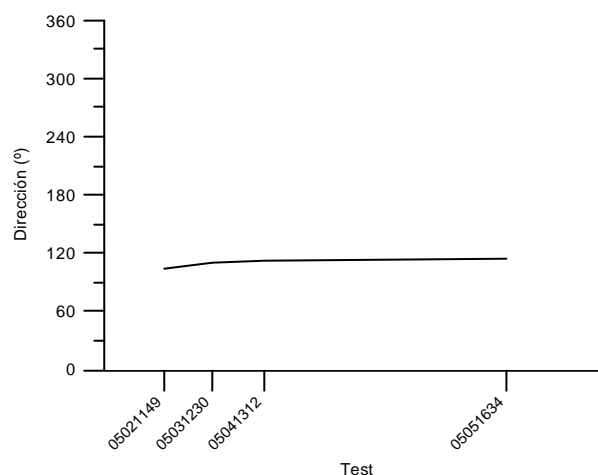


Figura 5.113.- Dirección del oleaje en el trineo.

A partir de las velocidades transversal v y longitudinal u a la costa se han obtenido los periodos de 5 minutos con mayor altura de ola media cuadrática H_{rms} de las series temporales de 30 minutos. De esta forma puede hallarse el periodo más energético de cada serie temporal. Una vez obtenidos dicho periodo de 5 minutos se han promediado las velocidades u (6000 datos) y las v (6000 datos) para ser representadas en las figuras 5.114 a 5.121.

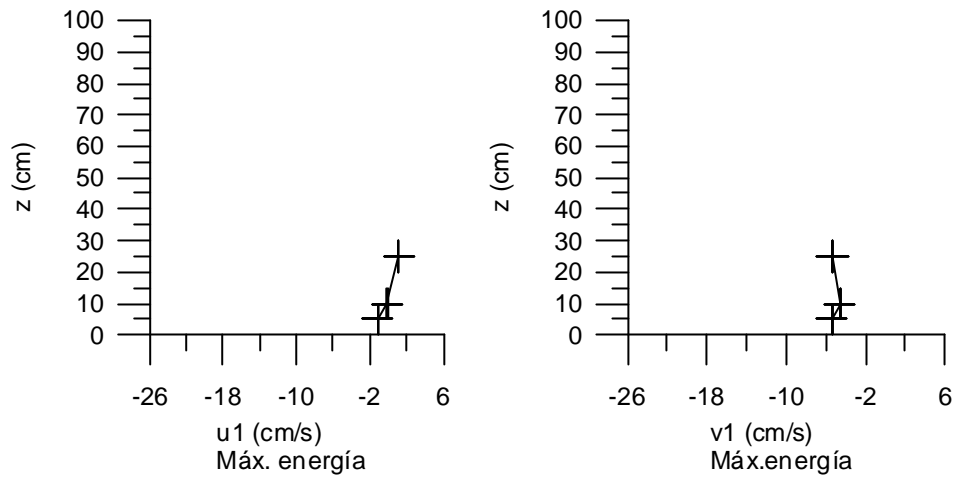


Figura 5.114.- Velocidad longitudinal (u_1) y transversal (v_1) a la costa medidas en el trineo durante el periodo de máxima energía del test 05021149.

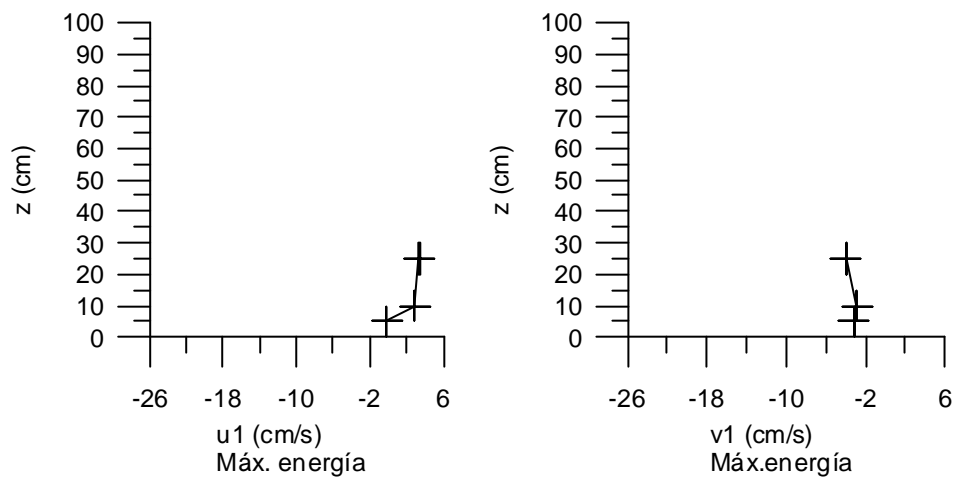


Figura 5.115.- Velocidad longitudinal (u_1) y transversal (v_1) a la costa medidas en el trineo durante el periodo de máxima energía del test 05031230.

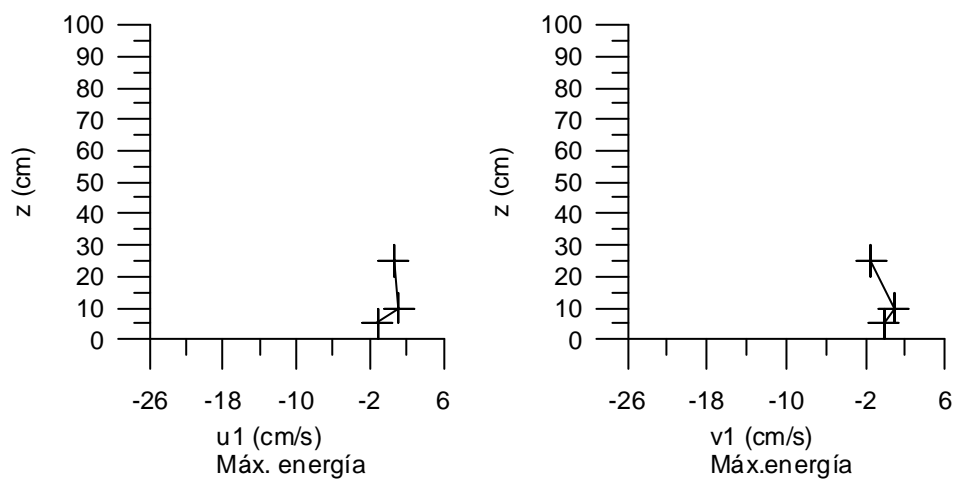


Figura 5.116.- Velocidad longitudinal (u_1) y transversal (v_1) a la costa medidas en el trineo durante el periodo de máxima energía del test 05041312.

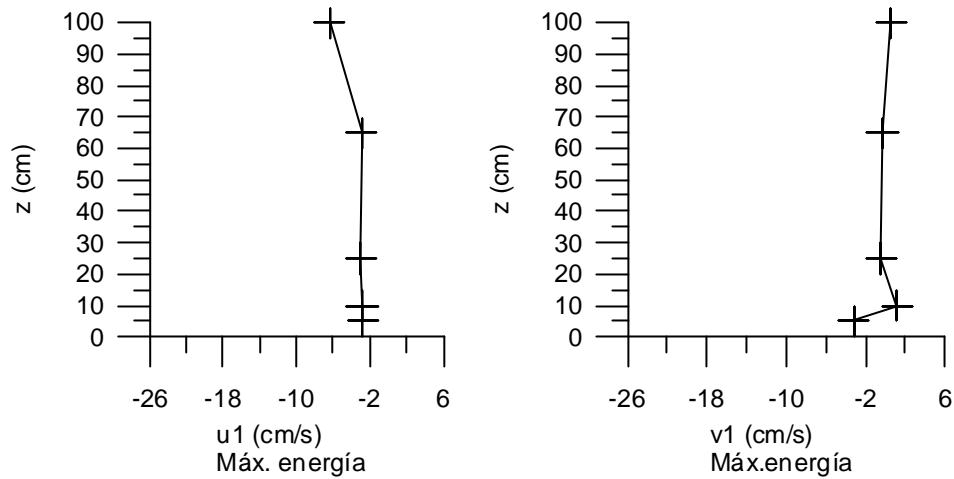


Figura 5.117.- Velocidad longitudinal (u_1) y transversal (v_1) a la costa medidas en el trineo durante el periodo de máxima energía del test 05051634.

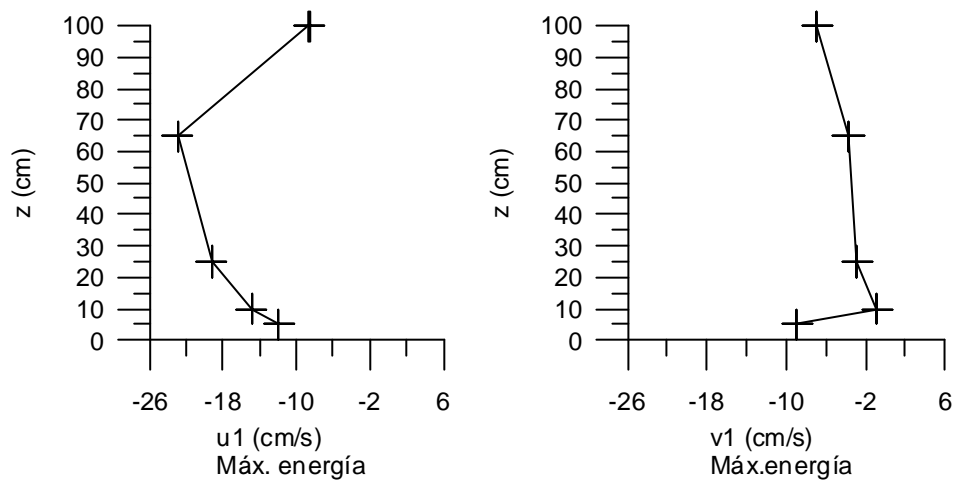


Figura 5.118.- Velocidad longitudinal (u_1) y transversal (v_1) a la costa medidas en el trineo durante el periodo de máxima energía del test 05062153.

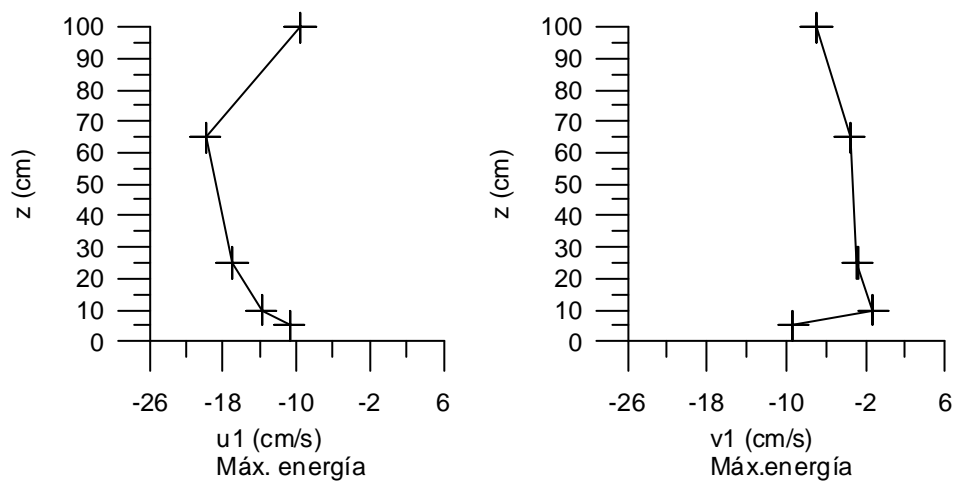


Figura 5.119.- Velocidad longitudinal (u_1) y transversal (v_1) a la costa medidas en el trineo durante el periodo de máxima energía del test 05072242.

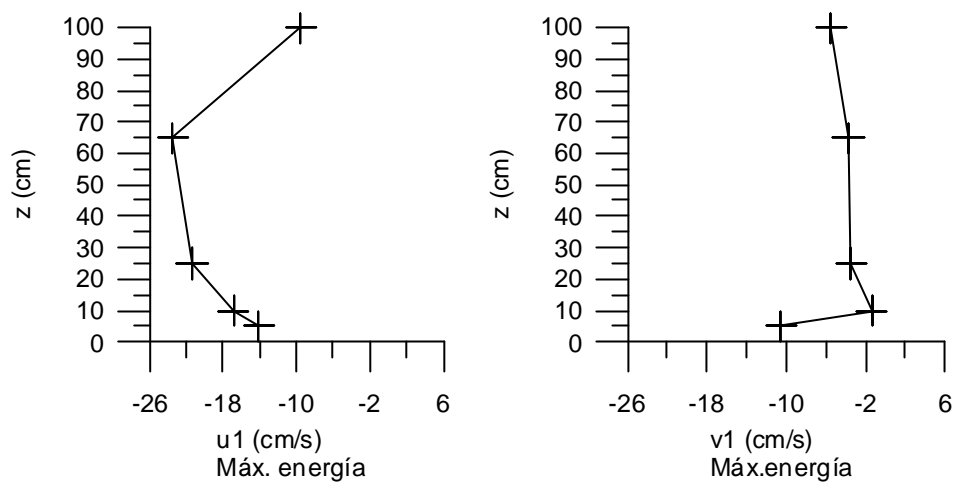


Figura 5.120.- Velocidad longitudinal ($u1$) y transversal ($v1$) a la costa medidas en el trineo durante el periodo de máxima energía del test 05082315.

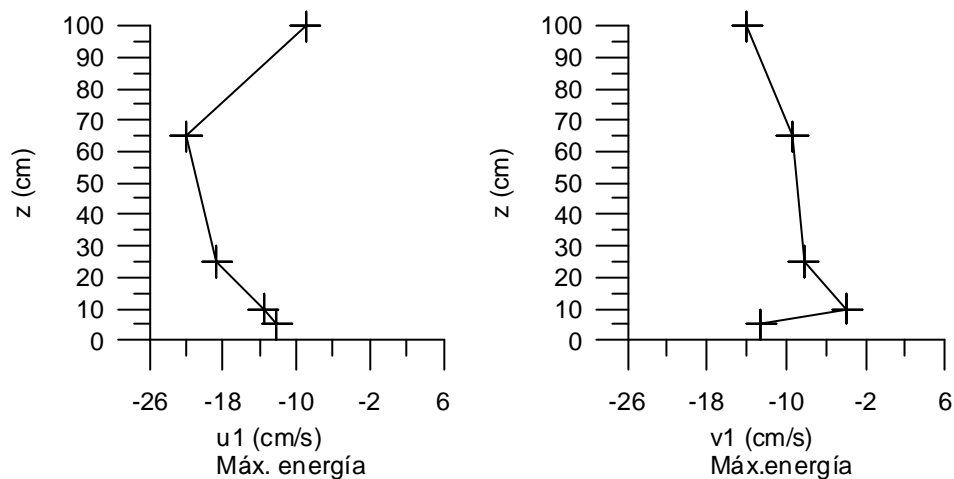


Figura 5.121.- Velocidad longitudinal ($u1$) y transversal ($v1$) a la costa medidas en el trineo durante el periodo de máxima energía del test 05092350.

Al igual que en los análisis de velocidades de Delta'93 (figuras 5.95 a 5.101), se han eliminado los valores de velocidad de los correntímetros en la parte superior de la columna de agua que hayan quedado intermitentemente fuera del agua por suministrar datos erróneos. Así, en los tests 05021149 (figura 5.114), 05031230 (figura 5.115) y 05041312 (figura 5.116) no aparecen los valores para los correntímetros situados a 65 y 100 cm del fondo ya que estos tres tests se realizaron a poca profundidad.

Las velocidades longitudinales u han sido muy bajas durante los cuatro primeros tests (figuras 5.114 a 5.117) pero a partir del quinto y hasta el último (figuras 5.118 a 5.121) se incrementaron bastante hasta llegar a valores próximos a los 25 cm/s en el correntímetro situado a 65 cm del fondo. La representación de la velocidad de la columna de agua en estos cinco últimos tests ha dado una forma parabólica con su máximo en el correntímetro colocado a 65 cm del fondo y con sentido hacia el sur (velocidades negativas).

Las velocidades transversales v fueron mayoritariamente en sentido *offshore* (negativas) y al igual que las longitudinales fueron mayores en los últimos tests, sobretodo en el 05092350 (figura 5.121) donde la velocidad transversal se aproximó a los 14 cm/s en los correntímetros situados a 5 y 100 cm del fondo.

A partir del cuarto test las velocidades longitudinales obtenidas han sido en la mayoría de casos bastante más grandes que las velocidades transversales. Esto indica que las corrientes longitudinales fueron bastante más fuertes que las corrientes transversales a la costa.

5.6.2.- Análisis de los cambios Batimétricos durante las campañas Delta'93 y Delta'96

5.6.2.1.- Delta'93

A lo largo de toda la campaña Delta'93 se realizaron numerosos perfiles batimétricos en la barra del Trabucador. La batimetría del área de estudio fue medida mediante un total de 31 perfiles transversales a la costa realizados el día 13 de diciembre de 1993 y el día 17 de diciembre de 1993, antes y después, respectivamente, de las mediciones hidrodinámicas de los días 15 y 16 de diciembre. La separación de dichos perfiles transversales fue de unos 15 m durante el día 13, mientras que el día 17 se espaciaron aproximadamente 30 m.

El sistema de coordenadas x, y, z "local" fue vinculado con el de coordenadas UTM (Universal Transversal de Mercator) para unificar el sistema de referencia de todos los instrumentos. El origen de las coordenadas transversales se impuso de manera arbitraria y estaba aproximadamente a 48 m de la línea de orilla media.

Para todos los levantamientos topográficos se utilizó instrumental convencional como estación total con distanciómetro infrarrojo, prismas ópticos, etc. Los perfiles medidos topográficamente llegan hasta una profundidad de 1.5-2 m. Se destaca que en condiciones de calma dicha técnica resulta adecuada (el error en z se estima cercano a 1 cm), pero durante la existencia de oleaje en rotura intenso acompañado de corrientes longitudinales fuertes, la medición de la batimetría a profundidades mayores a 1.5 m. resulta difícil. Esto dificulta la localización precisa de puntos singulares de interés, como el seno de la barra.

También se realizaron perfiles transversales simultáneos con las mediciones hidrodinámicas mediante el trineo, moviéndolo entre los postes de anclaje y midiendo su posición x, y, z en cada vertical de medición hidrodinámica.

Para llevar a cabo el análisis de los cambios batimétricos producidos durante el transcurso de la campaña, se han representado varios perfiles topográficos transversales a la costa del día 13 y 17 de diciembre. Para ello, se han fijado once (figura 5.122) valores del eje de abscisas x (eje paralelo a la dirección de la costa y con sentido positivo hacia el sur) y para cada valor se han representado los perfiles transversales (tanto el del día 13 como el del día 17 de diciembre) en una misma figura para, de esta

forma, poder compararlos. Los once valores fijados se han escogido lo más próximos posible a los valores de los perfiles medidos durante la campaña.

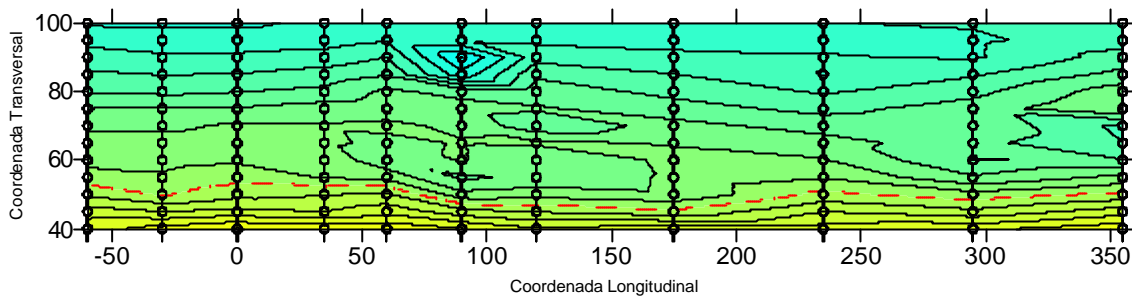


Figura 5.122.- Posición de los perfiles batimétricos considerados para la comparación batimétrica en la campaña Delta'93.

En la mayoría de las once figuras representadas (figura 5.123 a 5.133) se observa que se necesitan más de 50 m de distancia perpendicular a la costa para que se produzca una variación de cota superior los 2 m, es decir, había una pendiente media de $\approx 4\%$.

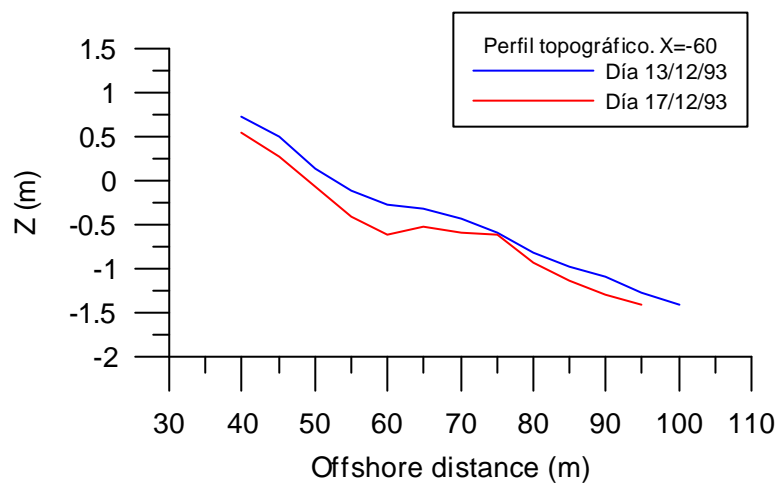


Figura 5.123.- Comparación entre perfil topográfico inicial y final para $x = -60$.

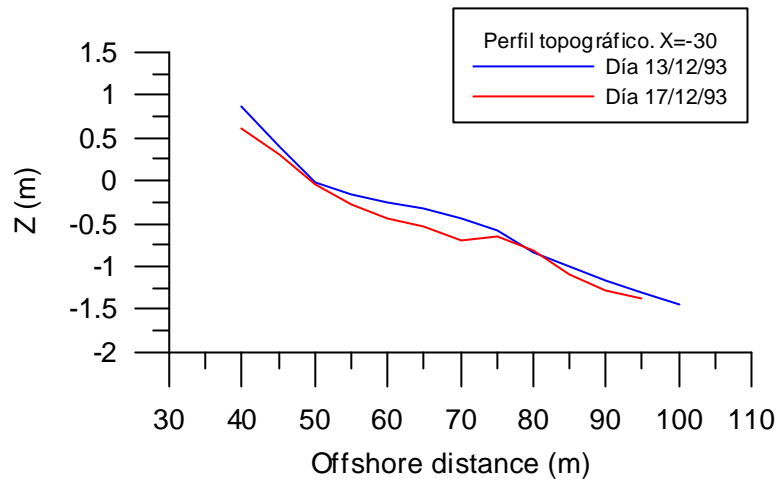


Figura 5.124.- Comparación entre perfil topográfico inicial y final para $x = -30$.

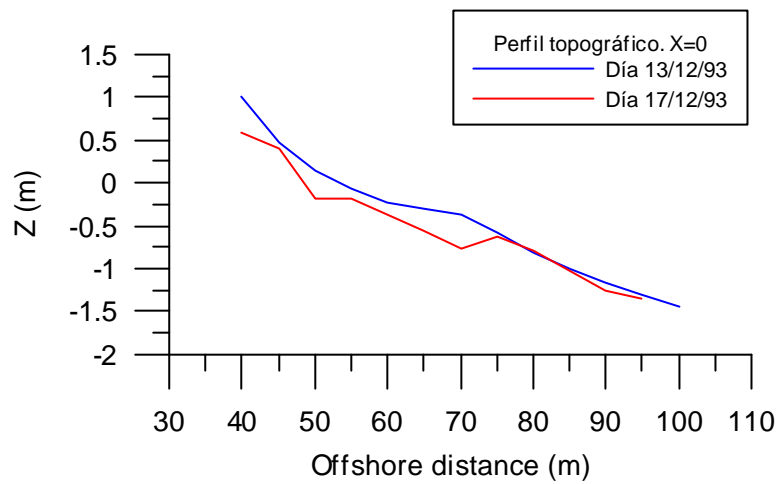


Figura 5.125.- Comparación entre perfil topográfico inicial y final para $x = 0$.

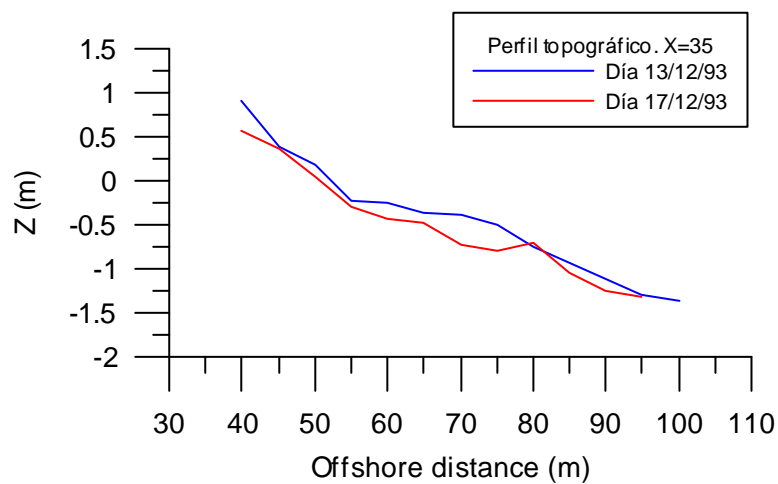


Figura 5.126.- Comparación entre perfil topográfico inicial y final para $x = 35$.

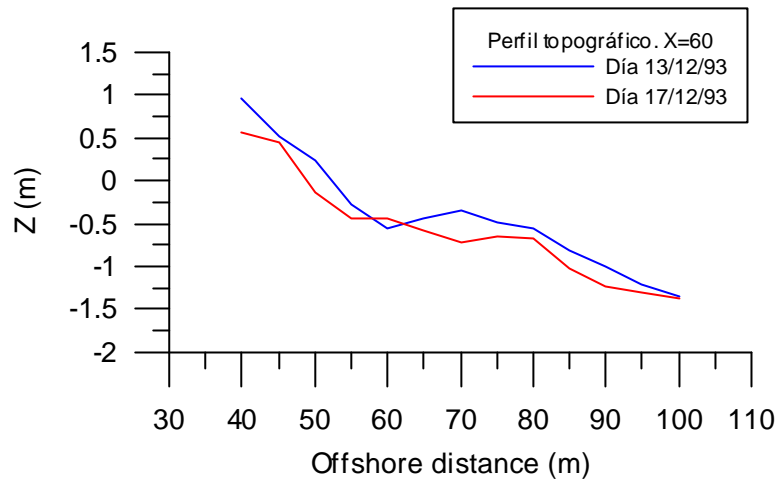


Figura 5.127.- Comparación entre perfil topográfico inicial y final para $x = 60$.

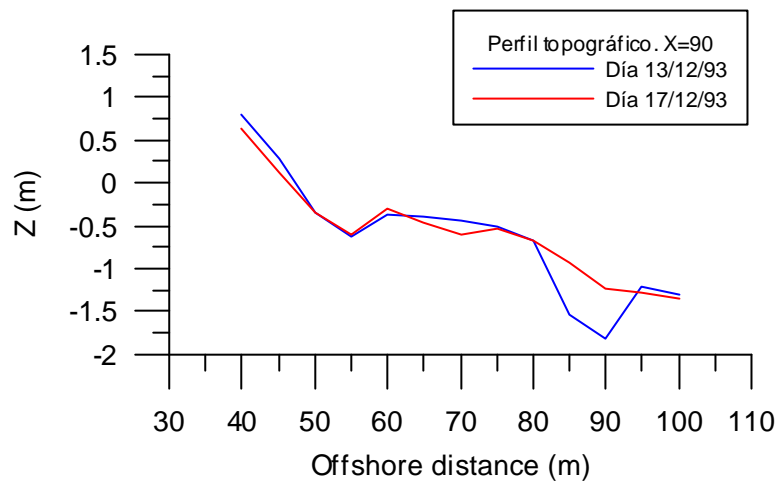


Figura 5.128.- Comparación entre perfil topográfico inicial y final para $x = 90$.

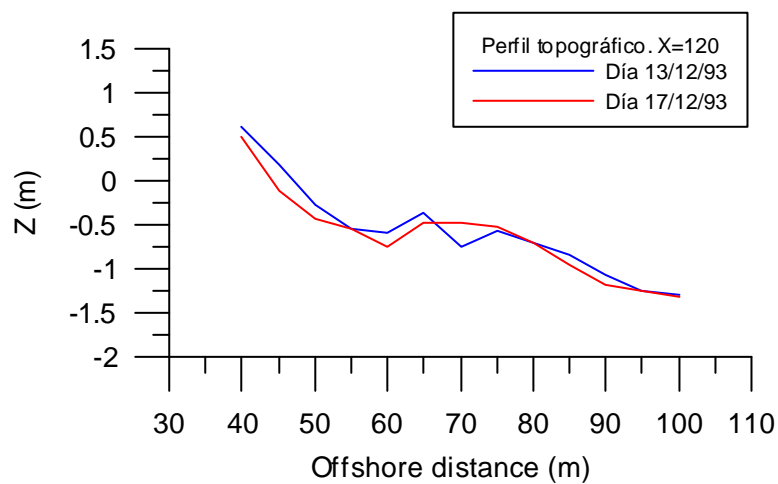


Figura 5.129.- Comparación entre perfil topográfico inicial y final para $x = 120$.

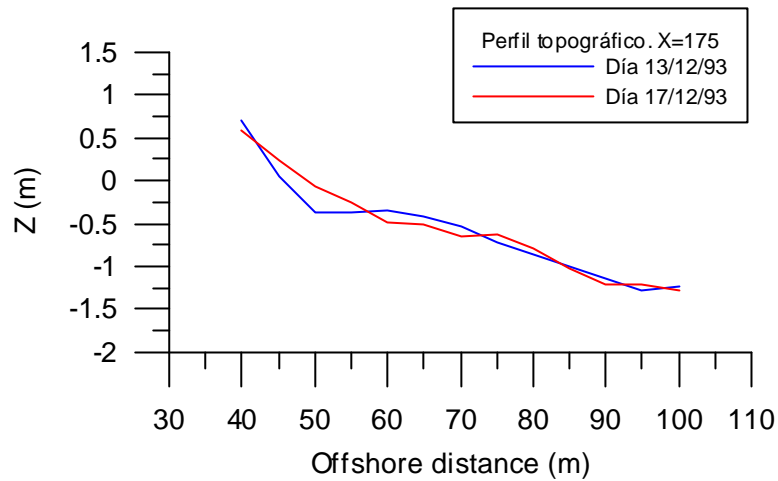


Figura 5.130.- Comparación entre perfil topográfico inicial y final para $x = 175$.

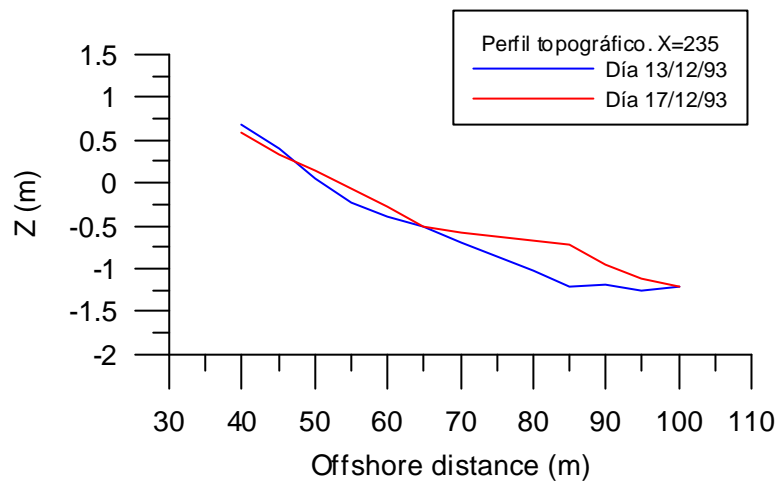


Figura 5.131.- Comparación entre perfil topográfico inicial y final para $x = 235$.

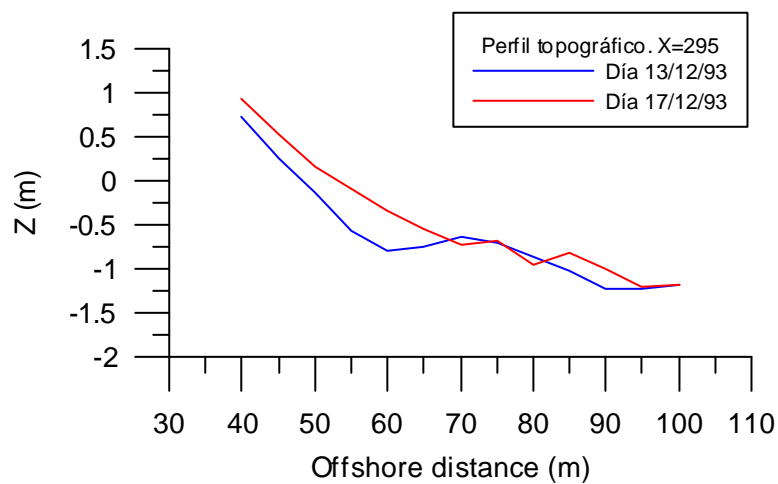


Figura 5.132.- Comparación entre perfil topográfico inicial y final para $x = 295$.

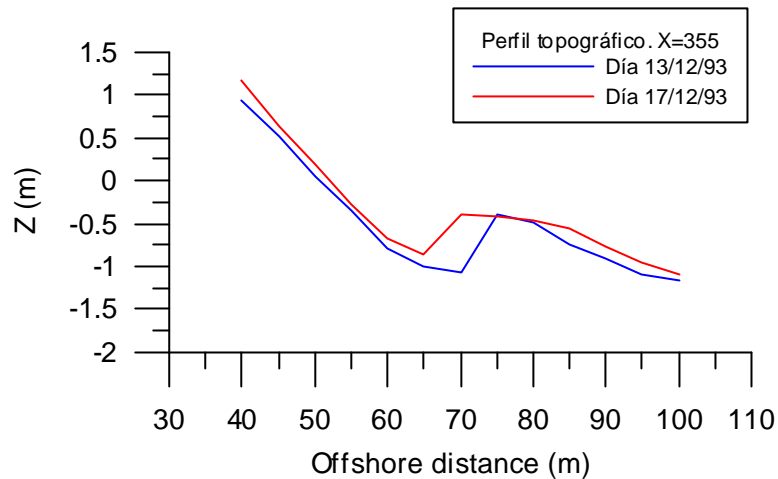


Figura 5.133.- Comparación entre perfil topográfico inicial y final para $x = 355$.

En el perfil topográfico $x = 0$ (figura 5.125) se observa que la pendiente relativamente uniforme y decreciente del día 13 no se mantuvo para el día 17 ya que éste último día sufrió bastantes variaciones, llegándose a producir una protuberancia (en forma de barra) en el fondo de aproximadamente 25 cm a unos 75 m de distancia transversal al origen del sistema coordenado local (aproximadamente a unos 27 m de la línea de orilla media). Este ascenso de la topografía fue poco representativo porque se produjo a lo largo de 5 metros y enseguida volvió a descender. Una elevación similar del fondo del mar se produjo en el perfil $x = 120$ (figura 5.129) pero en este caso la elevación se mantuvo unos 10 metros pudiéndose tratar de la formación de una barra.

Puede observarse un punto bajo importante (descenso de cota de más de 1 m) a unos 90 m de distancia transversal (aproximadamente a 42 m de la línea de orilla media) en el perfil topográfico $x = 90$ (figura 5.128) del día 13. En la batimetría del día 17 no apareció este punto bajo.

En el perfil $x = 355$ (figura 5.133) del día 17 se aprecia la posible formación de otra barra a unos 70 m de distancia transversal (aproximadamente a unos 22 m de la línea de orilla media) con un aumento de cota de aproximadamente medio metro.

De manera general, se puede comprobar que mientras en los perfiles situados más hacia el norte se produjo una clara erosión de la playa (ver figura 5.123 a 5.127), conforme los perfiles se trasladan hacia el sur la erosión disminuye, hasta producirse una acreción puesta de manifiesto en las figuras 5.131, 5.132 y 5.133.

Para apreciar más claramente la erosión o acreción producida en la playa se han representado las diferencias entre la cota final (17-12-93) y la inicial (13-12-93) en las figuras 5.134 a 5.144.

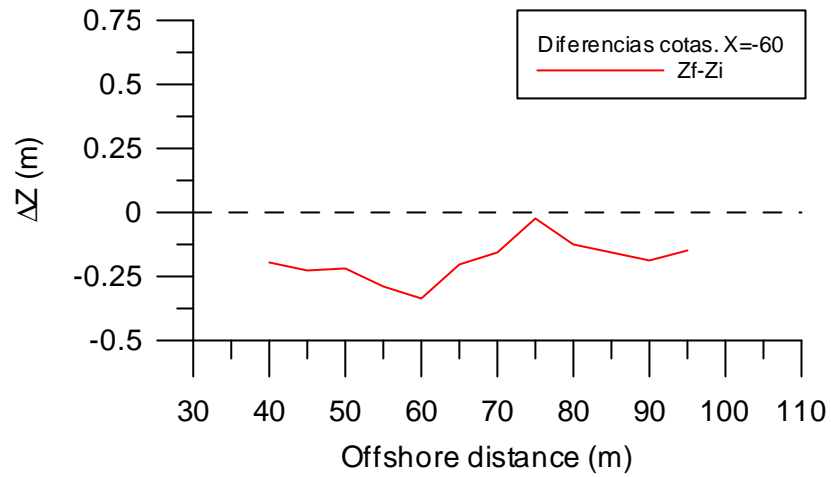


Figura 5.134.- Diferencias de cotas entre perfil inicial y final para $x = -60$.

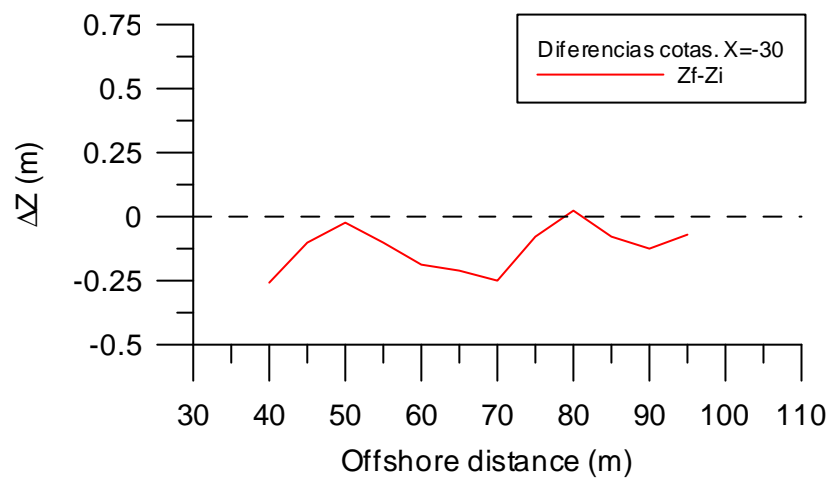


Figura 5.135.- Diferencias de cotas entre perfil inicial y final para $x = -30$.

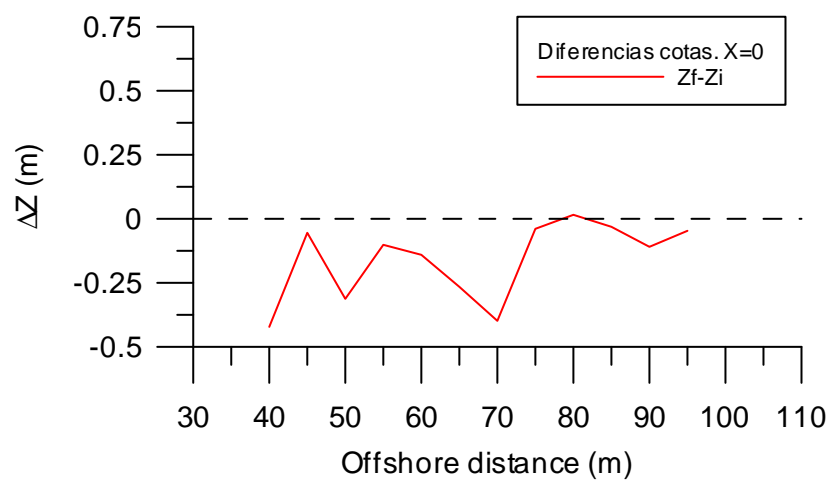


Figura 5.136.- Diferencias de cotas entre perfil inicial y final para $x = 0$.

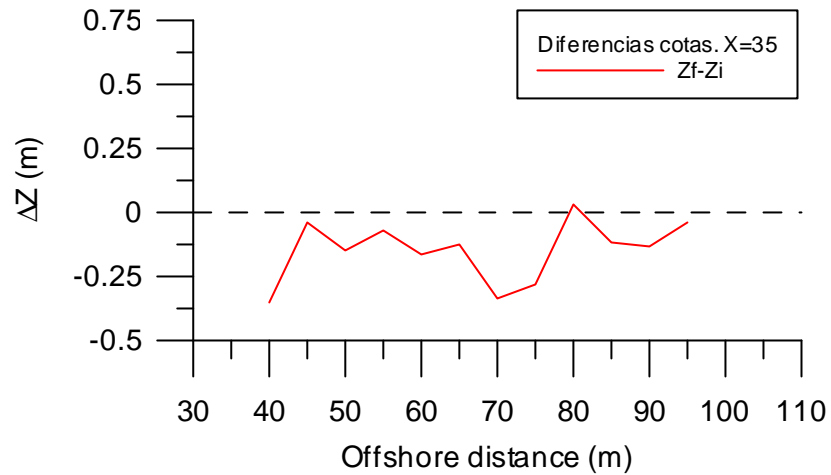


Figura 5.137.- Diferencias de cotas entre perfil inicial y final para $x = 35$.

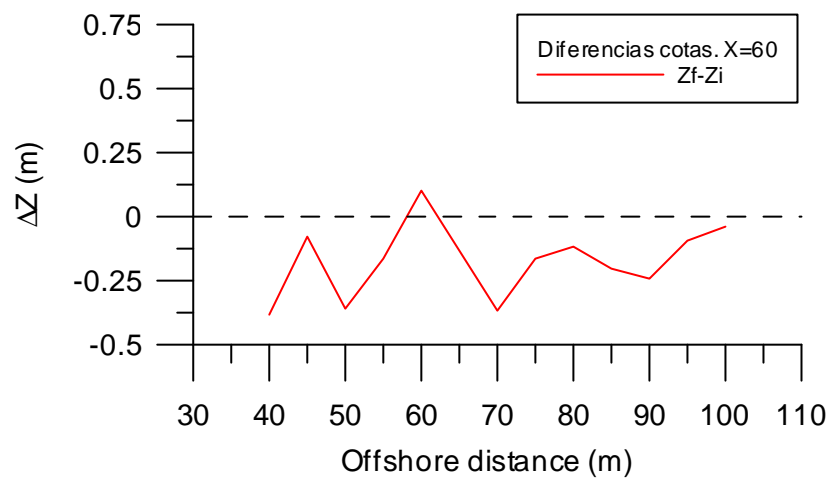


Figura 5.138.- Diferencias de cotas entre perfil inicial y final para $x = 60$.

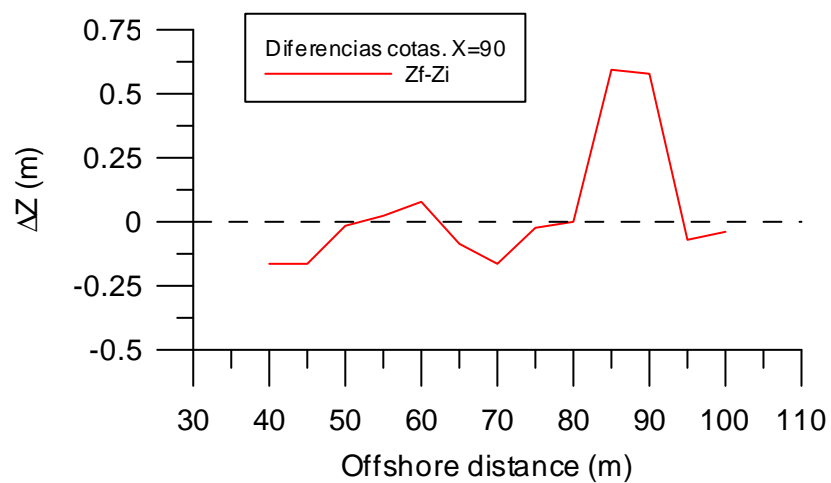


Figura 5.139.- Diferencias de cotas entre perfil inicial y final para $x = 90$.

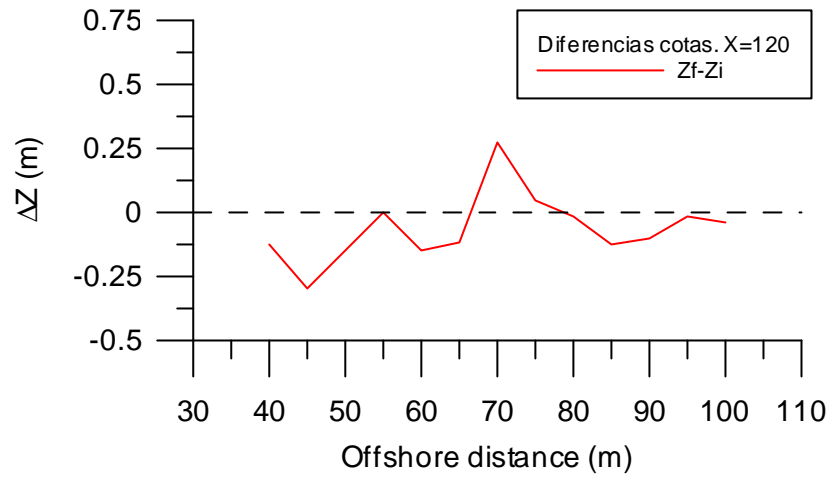


Figura 5.140.- Diferencias de cotas entre perfil inicial y final para $x = 120$.

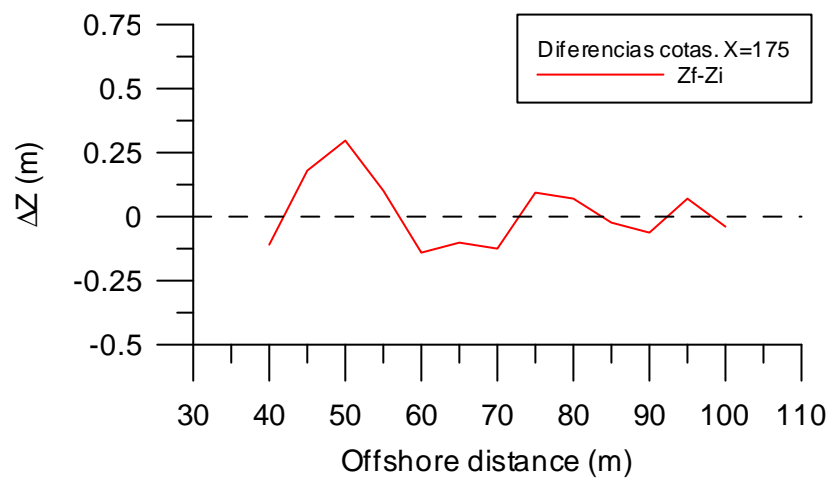


Figura 5.141.- Diferencias de cotas entre perfil inicial y final para $x = 175$.

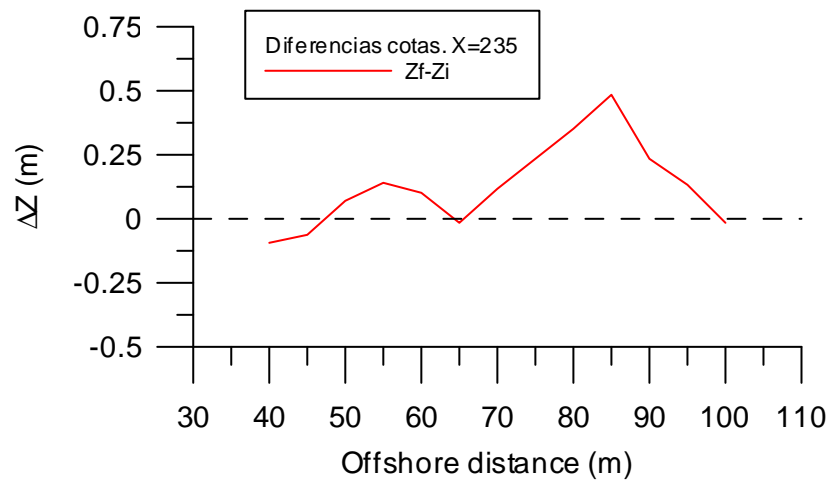


Figura 5.142.- Diferencias de cotas entre perfil inicial y final para $x = 235$.

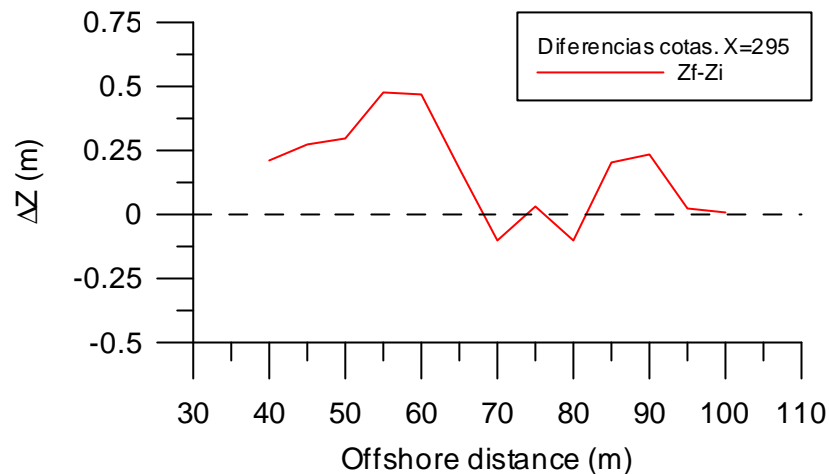


Figura 5.143.- Diferencias de cotas entre perfil inicial y final para $x = 295$.

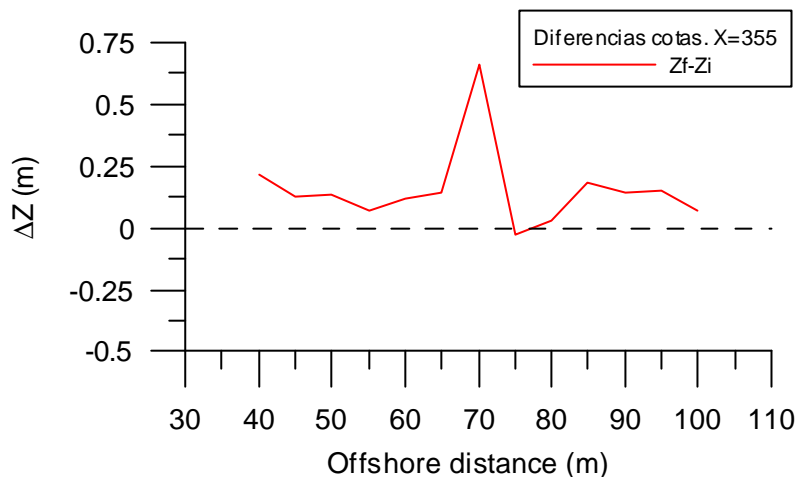


Figura 5.144.- Diferencias de cotas entre perfil inicial y final para $x = 355$.

En los once perfiles estudiados, solamente ha habido uno en el que se ha producido únicamente erosión y fue en $x = -60$ (ver figura 5.134). En este caso se ha calculado la “superficie” de arena erosionada dando un valor de 10.38 m^2 .

Un caso intermedio se ha dado para $x = 90$ (figura 5.139) aunque tomando todo el perfil predominó el depósito (3.42 m^2). Así, se han obtenido 6.14 m^2 de acreción, casi exclusivamente en los últimos 15 m del perfil, y 2.72 m^2 de erosión. Esta gran acreción concentrada en poco más de 10 m fue debida a la existencia del punto bajo anteriormente comentado.

En la figura 5.142, para $x = 235$, se ha obtenido un claro ejemplo de acreción, donde la cantidad de arena depositada fue de 8.83 m^2 . Los perfiles $x = 295$ (figura 5.143) y $x = 355$ (figura 5.144) son también ejemplos de acreción ya que apenas hubo erosión.

A continuación, puede verse una comparación entre la batimetría inicial (13/12/93) y final (17/12/93), respectivamente, del área de estudio (figura 5.145), así como las diferencias entre ambas (figura 5.146).

En la figura 5.145 se puede observar la existencia del punto bajo antes comentado, mientras que en la figura 5.146 puede apreciarse la posible formación de las barras antes citadas entre $x = 100$ y $x = 150$, y entre $x = 330$ y $x = 380$, a una distancia transversal comprendida entre los 60 y 80 m. Esta última barra podría ser una ampliación, puesto que ya se aprecia en la batimetría inicial. En las diferencias observadas entre las batimetrías inicial y final (figura 5.146), se observa por la tonalidad de los colores como en la zona norte del área de estudio la erosión es mayor que en la zona sur.

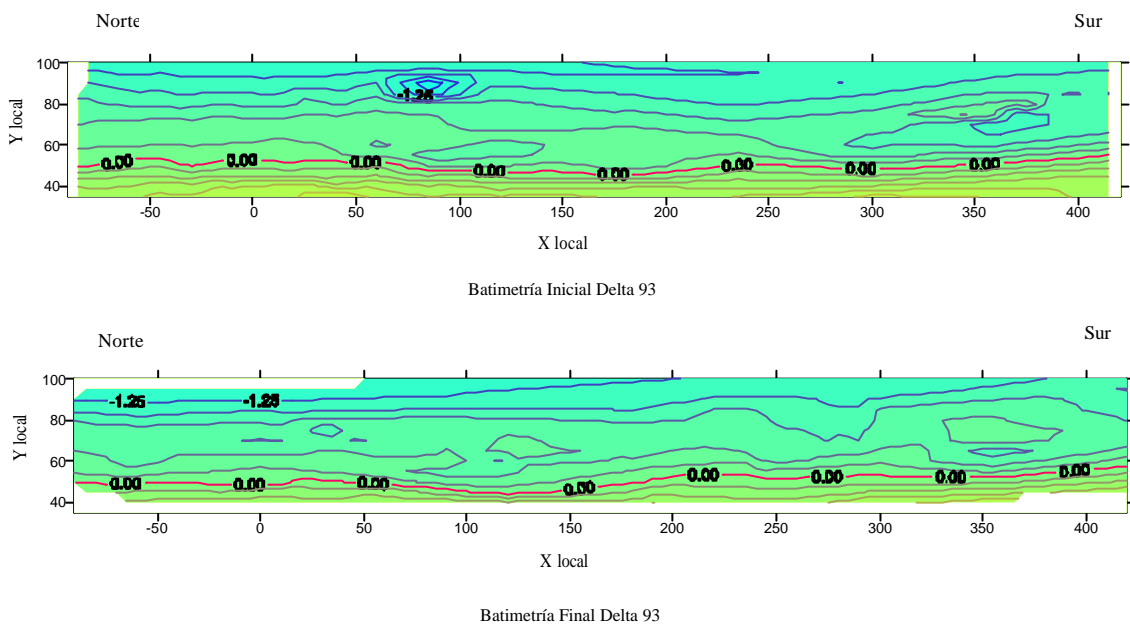


Figura 5.145.- Comparación entre las batimetrías, inicial y final, de la campaña Delta'93

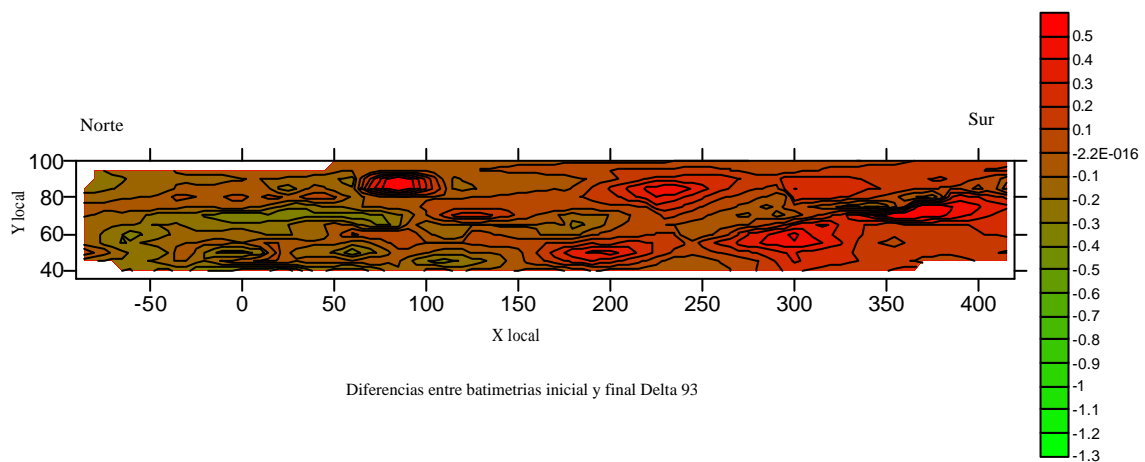


Figura 5.146.- Cambios cuantificados de la batimetría en la campaña Delta'93.

5.6.2.2.- *Delta'96*

Durante la campaña Delta'96 también se llevó a cabo una prospección topográfica antes (30-10-96) y después (9-11-96) de los experimentos, tomándose cada punto de los perfiles por radiación directa hasta una profundidad máxima de 2 metros por medio de instrumental convencional (estación total con distanciómetro infrarrojo y prismas ópticos), usándose también el trineo e imágenes aéreas de video. En el caso de los puntos tomados con el trineo, las mediciones fueron tomadas dos veces (al fin y al inicio de los ensayos) con el fin de determinar posibles rotaciones o movimientos del trineo (que finalmente sucedieron). Para el levantamiento de los perfiles topo-batimétricos se procesaron 1248 puntos distribuidos en 10 perfiles transversales a la costa, con una separación de 20 m entre los perfiles centrales y de 50 m entre los laterales.

En aquellas zonas donde la profundidad hacía imposible el acceso a pie, los levantamientos batimétricos se realizaron con métodos indirectos, usando la Zodiac del LIM y un escandallo. El posicionamiento de las medidas de profundidad (obviamente no se realizaron perfiles, sino que se obtuvo una nube de puntos) se realizó desde la playa.

Los trabajos realizados durante la campaña fueron siempre referenciados a un sistema de coordenadas local con el eje de abscisas paralelo a la dirección de la costa y el origen de coordenadas centrado en la zona de trabajo del trineo. Los datos se enlazaron planimétricamente al sistema de proyección UTM y altimétricamente al geoide de Cataluña GEOID'91. La línea de orilla media se localizaba aproximadamente a 23 m del origen del sistema local.

Para poder estudiar los cambios producidos en la batimetría durante los experimentos Delta'96 se han representado doce perfiles topográficos perpendiculares a la costa, tomados el día 30 de octubre y el día 9 de noviembre. Al igual que para Delta'93, se han fijado doce valores del eje de abscisas x (eje paralelo a la dirección de la costa y con sentido positivo hacia el sur) y para cada valor se han representado los perfiles transversales, tanto el tomado el día 30 como el tomado el día 9, en una misma figura para, de esta forma, poder compararlos. Los doce valores fijados se han escogido lo más próximo posible a los valores de los perfiles medidos durante la campaña.

El resultado gráfico de dichos perfiles se puede observar en las figuras 5.147 a 5.158, donde existen nueve perfiles topográficos que abarcan 60 m (30-90) de distancia perpendicular a la costa (figuras 5.147 a 5.150 y 5.154 a 5.158) y tres perfiles que abarcan 140 m (30-170) de distancia transversal (figuras 5.163, 5.164 y 5.165). En este caso se han podido realizar estos tres perfiles más largos gracias a los puntos obtenidos a mayor distancia de la costa y entorno al perfil $x = 0$ mediante la Zodiac.

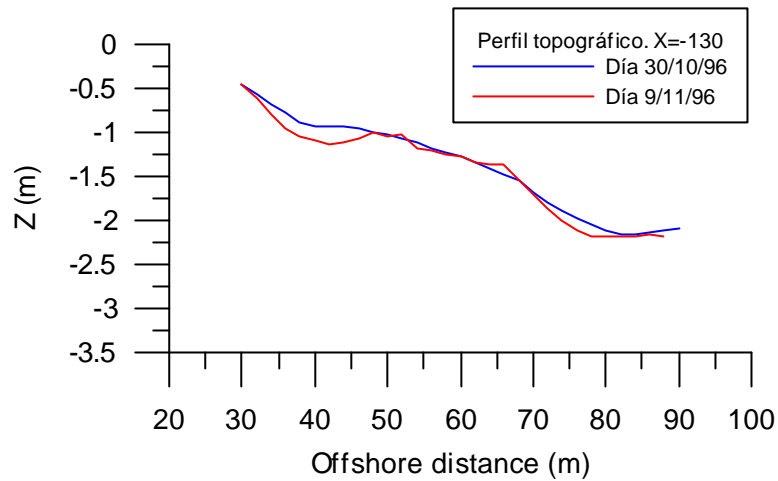


Figura 5.147.- Comparación entre perfil topográfico inicial y final para $x = -130$.

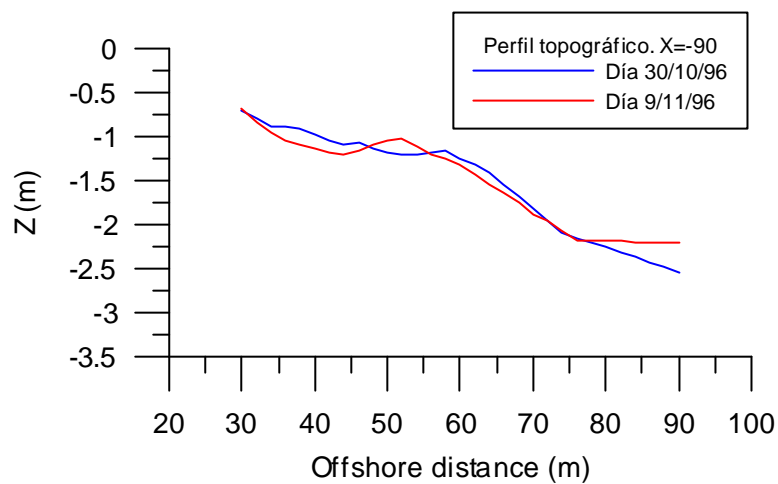


Figura 5.148.- Comparación entre perfil topográfico inicial y final para $x = -90$.

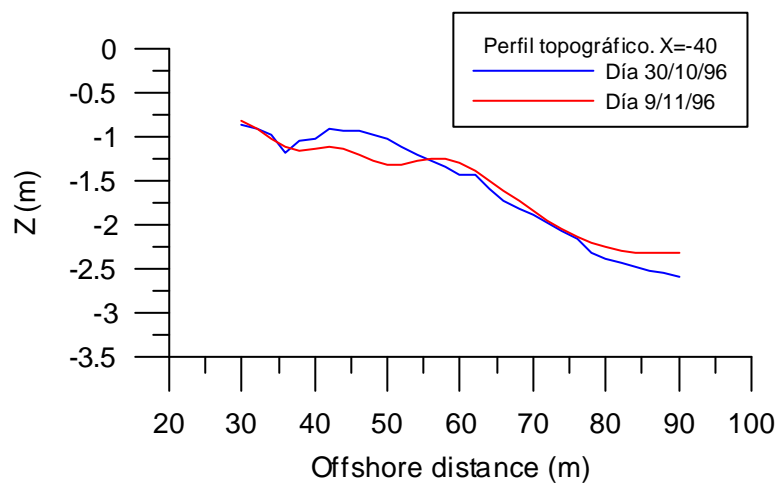


Figura 5.149.- Comparación entre perfil topográfico inicial y final para $x = -40$.

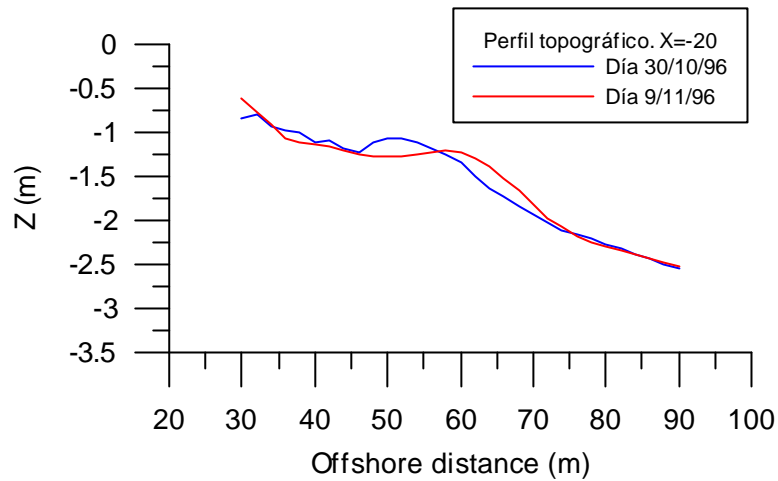


Figura 5.150.- Comparación entre perfil topográfico inicial y final para $x = -20$.

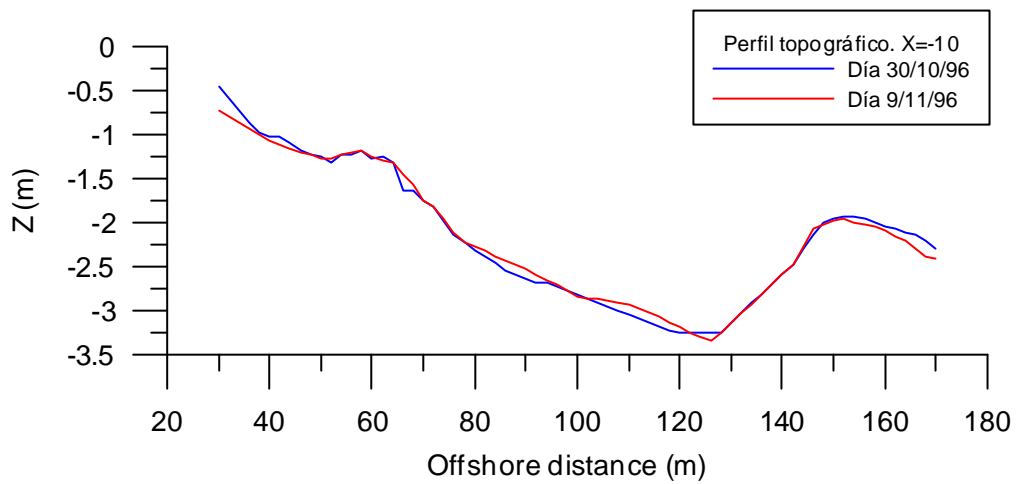


Figura 5.151.- Comparación entre perfil topográfico inicial y final para $x = -10$.

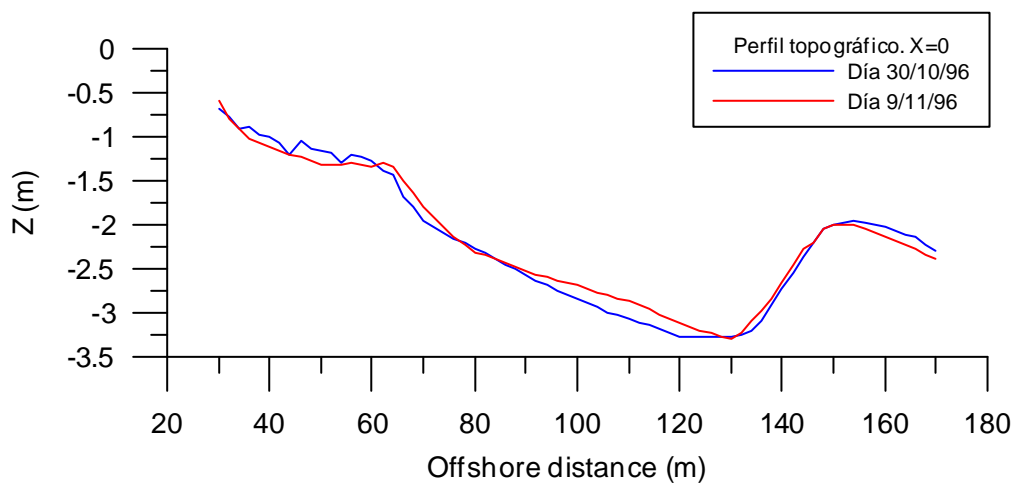


Figura 5.152.- Comparación entre perfil topográfico inicial y final para $x = 0$.

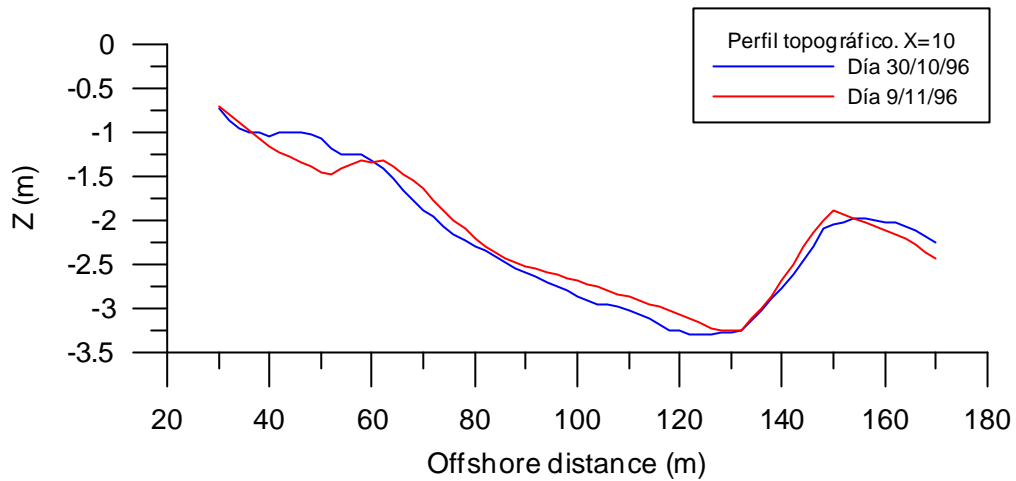


Figura 5.153.- Comparación entre perfil topográfico inicial y final para $x = 10$.

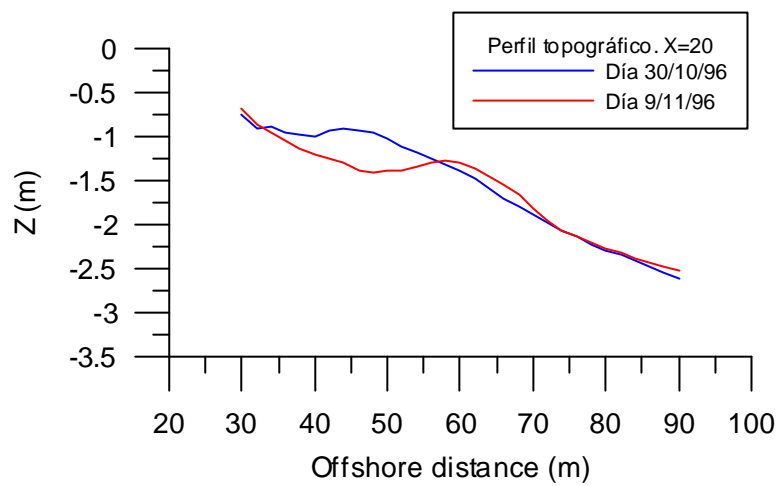


Figura 5.154.- Comparación entre perfil topográfico inicial y final para $x = 20$.

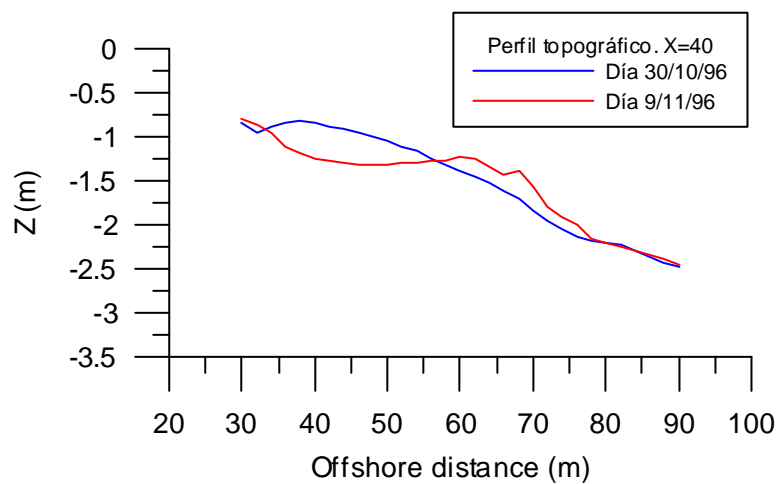


Figura 5.155.- Comparación entre perfil topográfico inicial y final para $x = 40$.

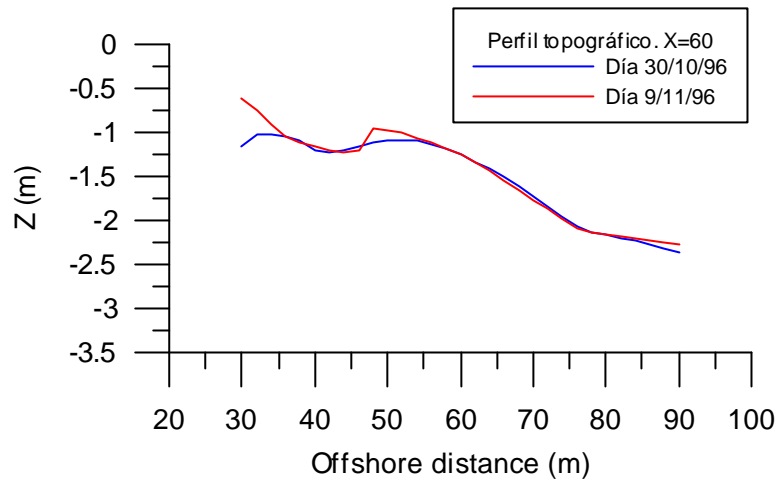


Figura 5.156.- Comparación entre perfil topográfico inicial y final para x = 60.

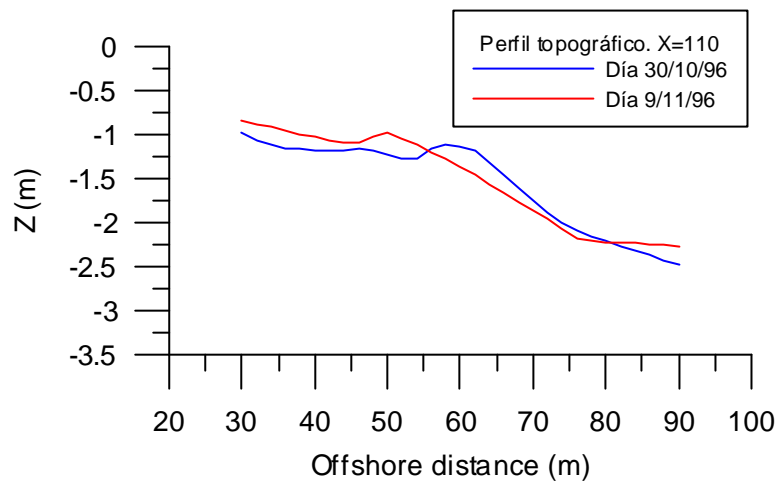


Figura 5.157.- Comparación entre perfil topográfico inicial y final para x = 110.

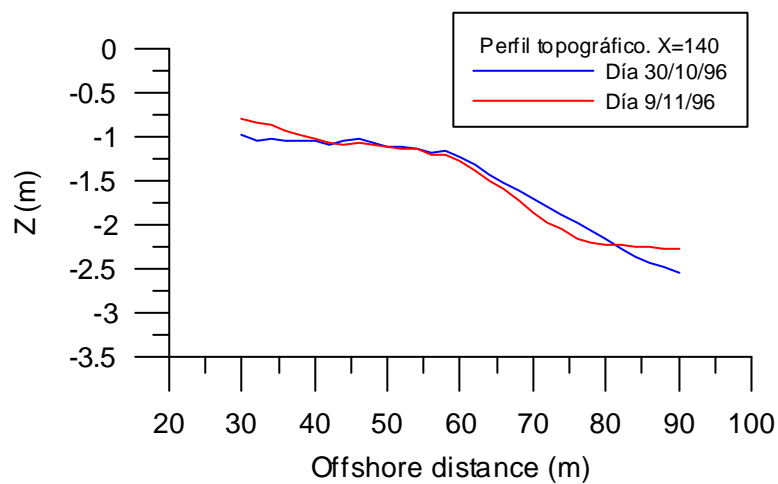


Figura 5.158.- Comparación entre perfil topográfico inicial y final para x = 140.

Tanto en el perfil del día 30 de octubre como en el del 9 de noviembre se identifica claramente (en los perfiles $x = -10, 0$ y 10) la existencia de una barra sumergida a unos 150 m. de la costa cuya cresta se encontraba a unos 2 m de profundidad (ver figuras 5.151, 5.152 y 5.153). En dicha barra se producía un aumento de cota de más de un metro en menos de 20 m de distancia transversal, ya que aproximadamente a unos 133 m de distancia transversal al origen del sistema coordenado local (aproximadamente a 110 m de la línea de orilla media) se sobrepasaban los 3 m de profundidad.

En los perfiles del día 9 para $x = -90$ (figura 5.148) y $x = 60$ (figura 5.156) se aprecia una diferencia con respecto a los perfiles del día 30, donde aparece una pequeña barra a 50 m del origen del sistema local (aproximadamente a 27 de la línea de orilla media), que no existía al inicio de los experimentos. Un caso similar se puede apreciar en el perfil $x = 20$ (figura 5.154), aunque en este caso la barra se situó a 60 m del origen (aproximadamente a 37 m de la costa), produciéndose justo antes (entre los 35 y 55 m. de distancia del origen del sistema local) una socavación del fondo del mar de hasta medio metro de altura respecto a la batimetría inicial. Dicha socavación se repitió en el perfil $x = 40$ (figura 5.155), donde puede observarse una cierta tendencia de transporte de sedimento en dirección *offshore* en la figura 5.155 ya que la erosión producida entre los 35 y 55 m de distancia transversal al origen del sistema local, vino seguida de una acreción entre los 55 y 75 m al origen del sistema local. Por otra parte, en la figura 5.153 correspondiente al perfil $x = 10$ se puede observar también dicho transporte transversal de sedimento, así como la posible existencia de la barra a 60 m del origen del sistema local.

Para ver más claramente la erosión o acreción producida en la playa se han representado las diferencias entre la cota final (9-11-96) y la inicial (30-10-96) en las figuras 5.159 a 5.170.

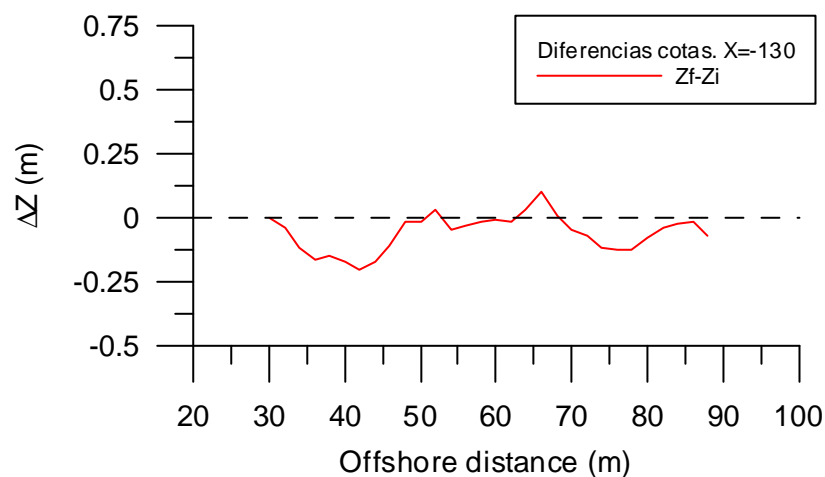


Figura 5.159.- Diferencias de cotas entre perfil inicial y final para $x = -130$.

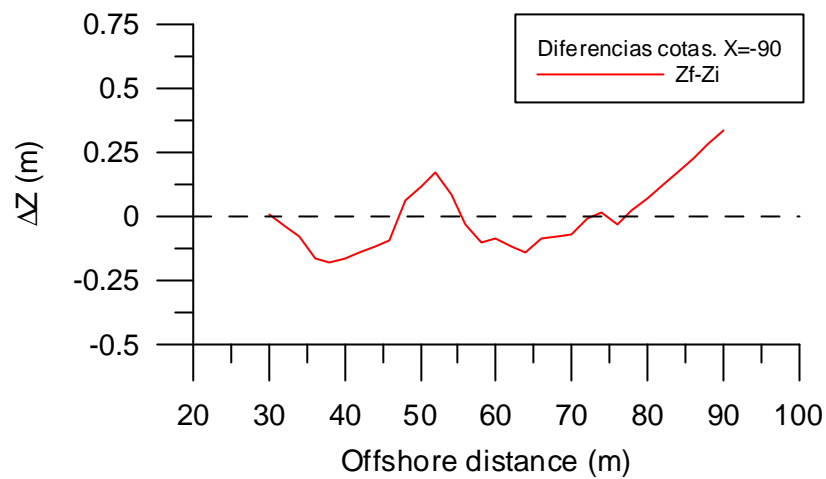


Figura 5.160.- Diferencias de cotas entre perfil inicial y final para $x = -90$.

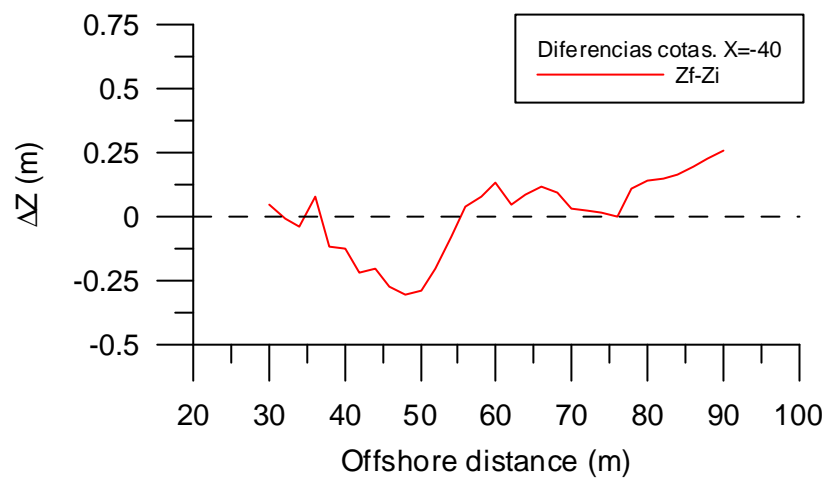


Figura 5.161.- Diferencias de cotas entre perfil inicial y final para $x = -40$.

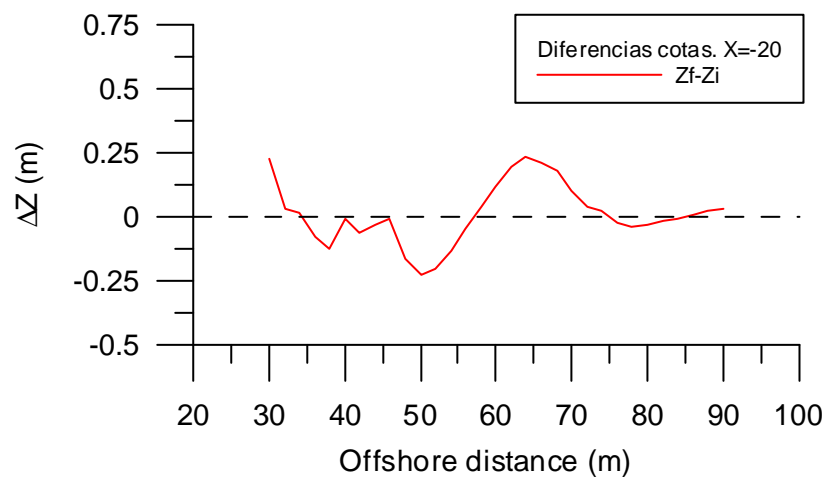


Figura 5.162.- Diferencias de cotas entre perfil inicial y final para $x = -20$.

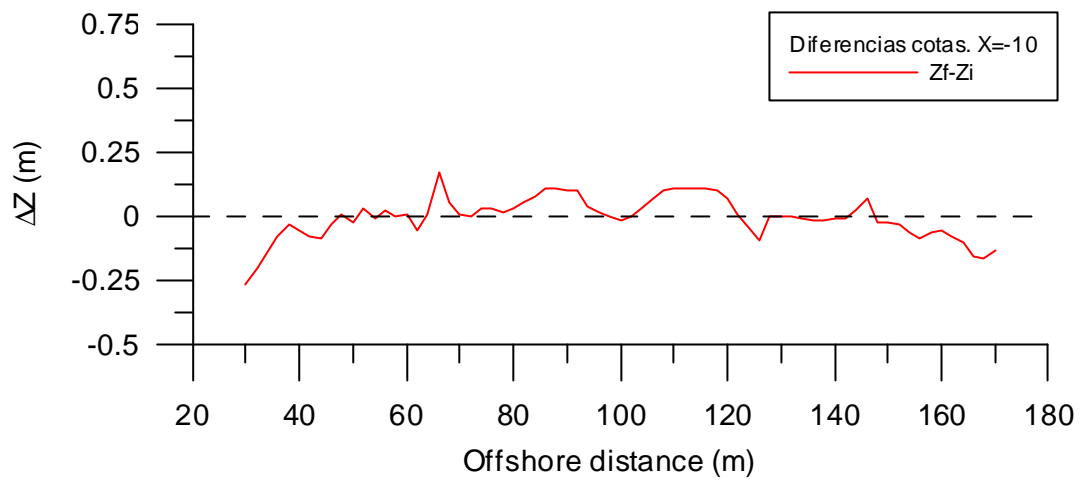


Figura 5.163.- Diferencias de cotas entre perfil inicial y final para $x = -10$.

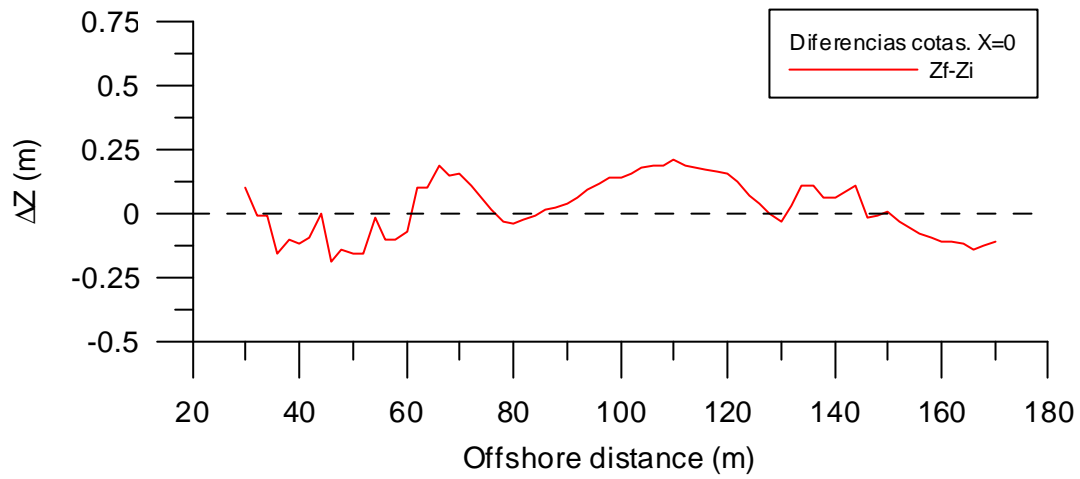


Figura 5.164.- Diferencias de cotas entre perfil inicial y final para $x = 0$.

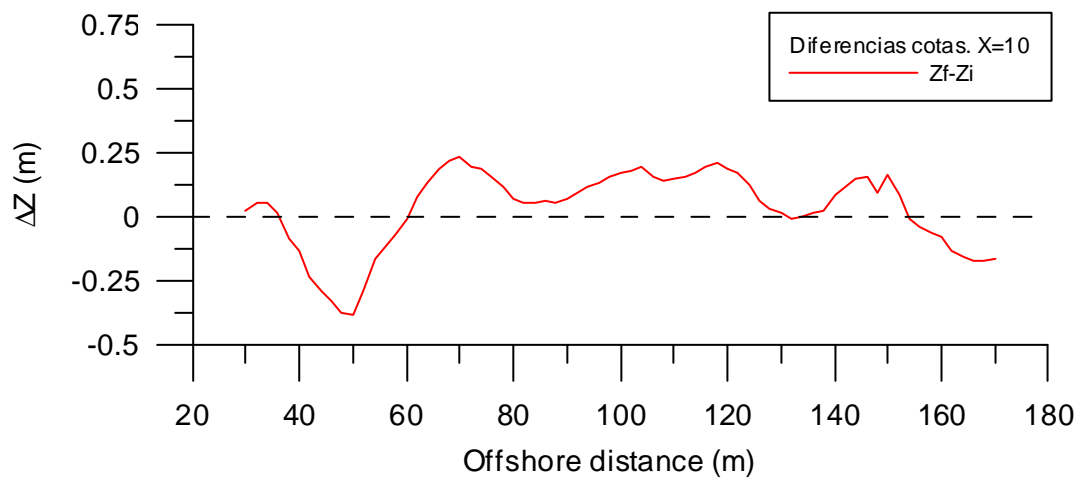


Figura 5.165.- Diferencias de cotas entre perfil inicial y final para $x = 10$.

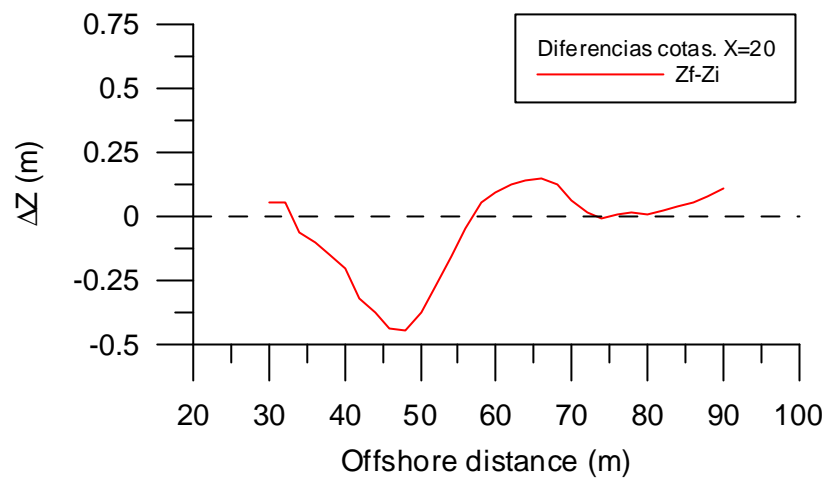


Figura 5.166.- Diferencias de cotas entre perfil inicial y final para $x = 20$.

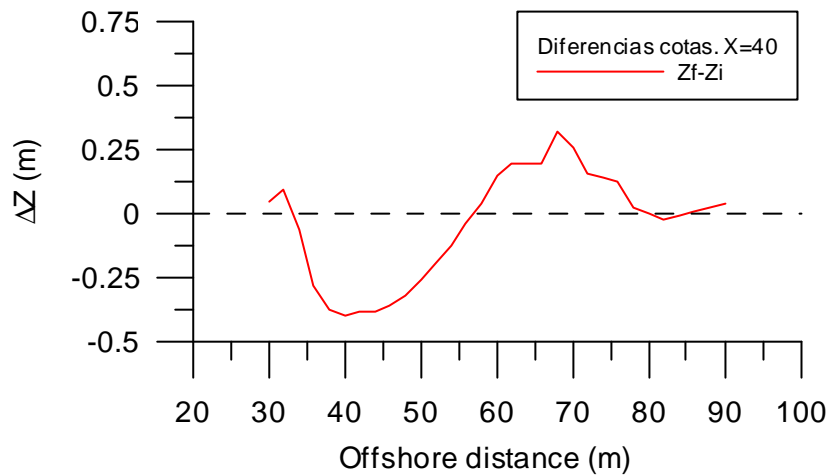


Figura 5.167.- Diferencias de cotas entre perfil inicial y final para $x = 40$.

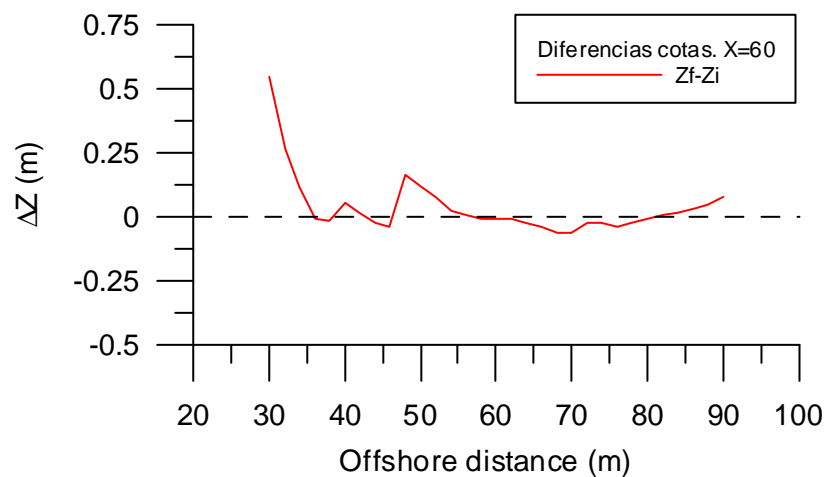


Figura 5.168.- Diferencias de cotas entre perfil inicial y final para $x = 60$.

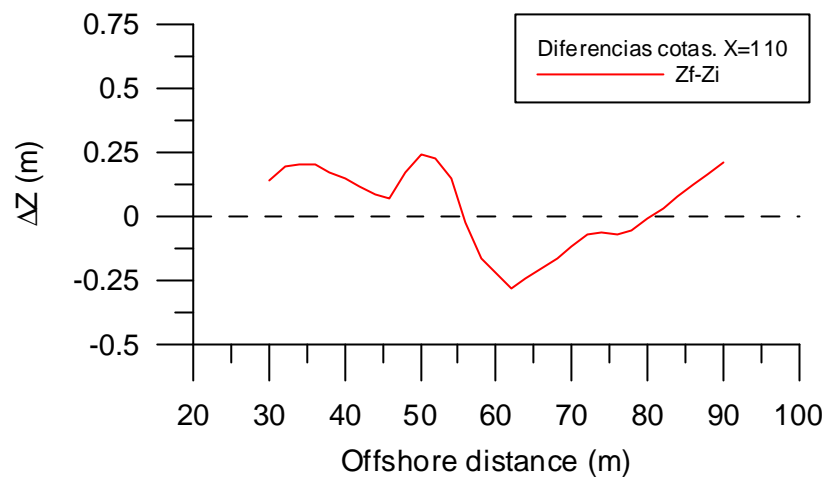


Figura 5.169.- Diferencias de cotas entre perfil inicial y final para $x = 110$.

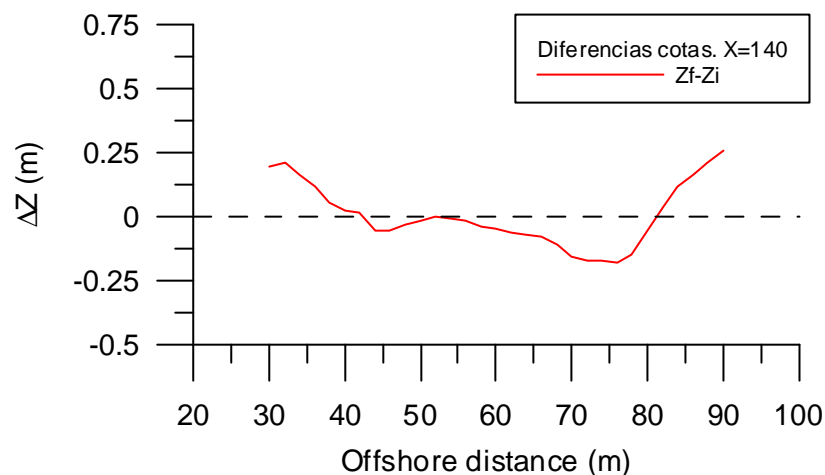


Figura 5.170.- Diferencias de cotas entre perfil inicial y final para $x = 140$.

A diferencia que en Delta'93, en los doce casos aquí analizados no se ha obtenido ninguno en que se haya producido únicamente erosión. Como ejemplo de un caso con mayor erosión se ha escogido el correspondiente a $x = 20$ (figura 5.166) y se ha calculado la superficie de arena erosionada siendo ésta de 8.97 m^2 .

Un perfil donde se han producido cambios importantes (bastante erosión pero también mucho depósito) fue el perfil $x = 40$ (figura 5.167). Se ha obtenido que la erosión fue de 15.70 m^2 y la acreción de 9.69 m^2 , dando de esta forma una erosión total de 6.01 m^2 .

El transporte de sedimentos transversal en dirección *offshore* se pone de manifiesto en las figuras 5.161, 5.162, 5.166 y 5.167 correspondientes a los perfiles $x = -40$, $x = -20$, $x = 20$ y $x = 40$, respectivamente, donde el proceso de erosión viene seguido de un proceso de acreción.

Mientras que en los perfiles que sólo llegan hasta 90 m de la costa fue predominante la erosión, en los perfiles que llegan hasta 170 m (ver figuras 5.163, 5.164 y 5.165) hubo

mayoritariamente acreción. Así, la acreción total obtenida en el perfil largo $x = 10$ (figura 5.165) ha sido de 12.50 m^2 . De entre los perfiles cortos, el perfil $x = 110$ (figura 5.169) fue uno de los que tuvo más depósito, siendo éste de 4.61 m^2 .

A continuación, puede verse una comparación entre la batimetría inicial (30/10/96) y final (9/11/96), respectivamente, del área de estudio (figura 5.171), así como las diferencias entre ambas (figura 5.172).

En la figura 5.171, en la batimetría inicial se puede observar la existencia de un punto alto cerca de $x = 30$, mientras que en la batimetría final puede apreciarse de forma clara entre $x = -150$ y $x = 50$, y entre $x = 50$ y $x = 100$, aproximadamente, la barra anteriormente citada a unos 50 m. de distancia de la costa. La figura 5.172 muestra las diferencias en las batimetrías inicial y final y en la figura 5.173 puede observarse como en el tramo central la barra se rompió.

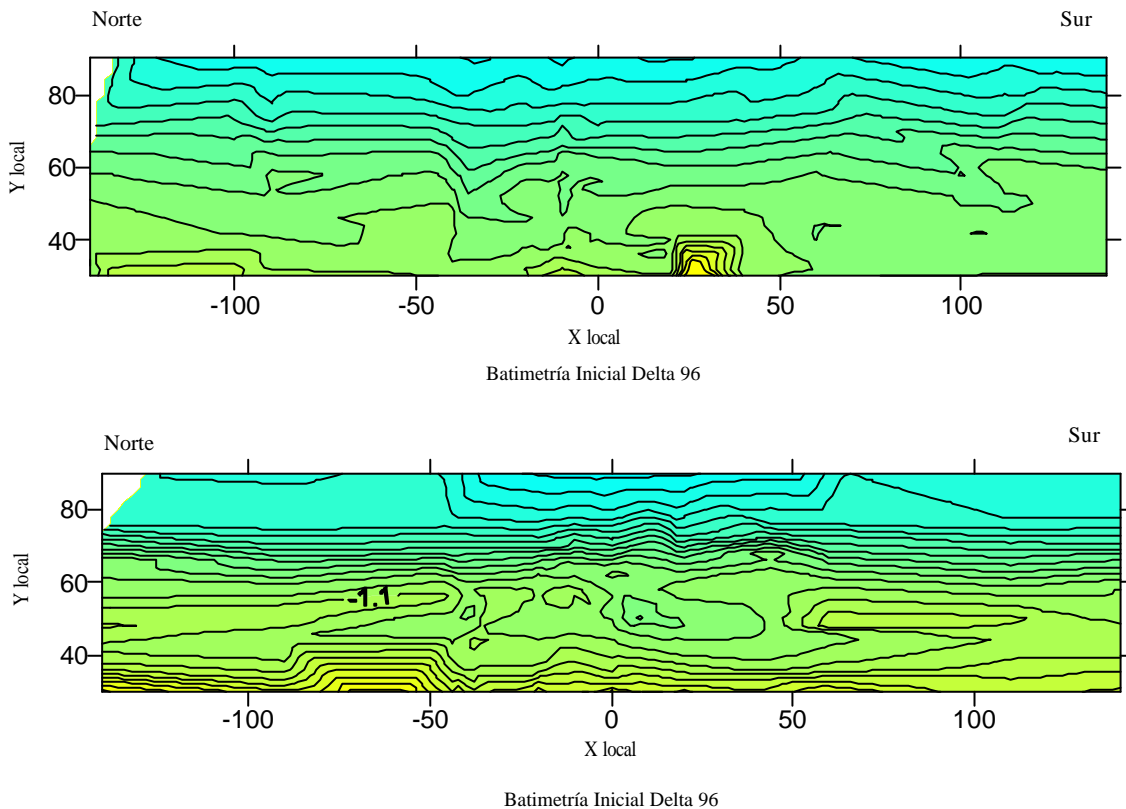


Figura 5.171.- Comparación entre las batimetrías, inicial y final, de la campaña Delta'96.

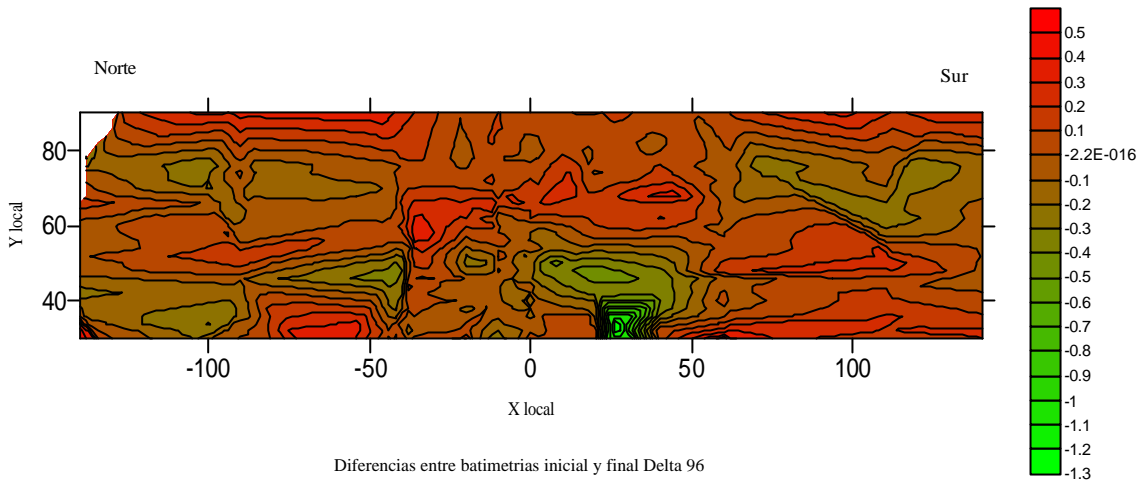


Figura 5.172.- Cambios cuantificados de la batimetría en la campaña Delta'96.

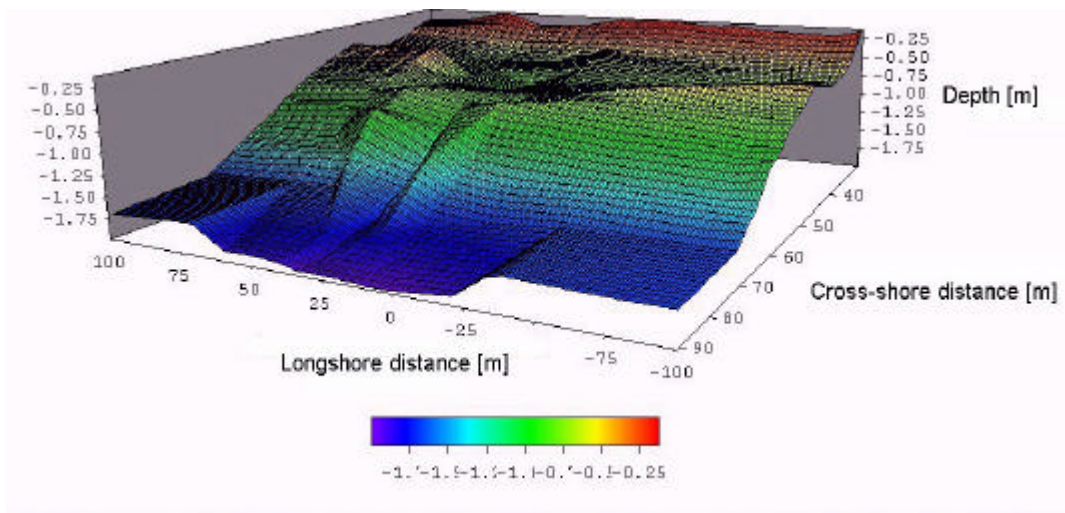


Figura 5.173.- Representación 3D de la barra rota después de la campaña Delta'96.

Es interesante notar que la barra rota se evidenció antes de la realización de la topografía final. Durante el desmontaje del trineo se tiraron unas boyas lagrangianas que describieron una trayectoria curva, primero hacia la costa, y luego en dirección *offshore* justo por encima de la barra rota debido posiblemente a una corriente de retorno. La cuantificación y de la trayectoria y velocidades seguidas por las boyas se realizó por medio de una sucesión de imágenes completas, con un periodo de 10 segundos y durante 8 minutos (Mösso *et al.*, 1997). La posición (trayectoria) de las boyas se determinó en cada instante con lo que se pudieron observar velocidades de hasta 70 cm/s.

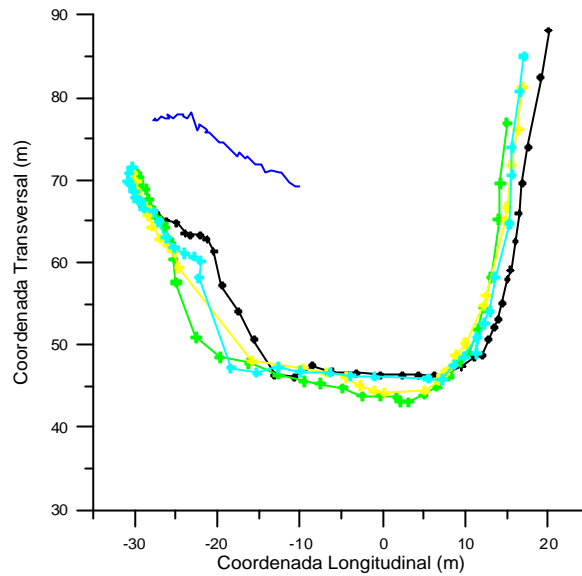


Figura 5.174.- Trayectoria de las boyas lagrangianas.

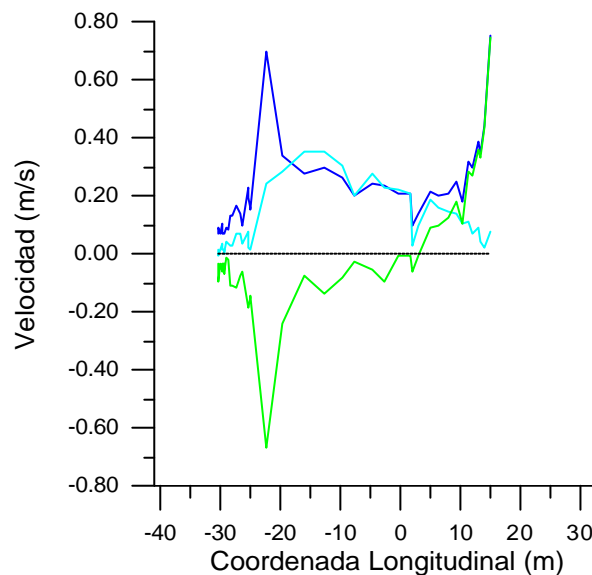


Figura 5.175.- Velocidades registradas por las boyas lagrangianas.

Con los datos topográficos y de altura de ola registrada en el momento de la filmación, se determinó una pequeña asimetría de la barra que provocó una asimetría en la rotura del oleaje. El cálculo de la altura de ola fue de $H_b = 0.4$ m a la izquierda de la figura 5.176 y de $H_b = 0.38$ m a la derecha de la misma figura. Esto a su vez provocó que la corriente longitudinal calculada fuera mayor al norte (de 41 cm/s) que en el sur (de 38 cm/s). Esta diferencia también fue observada en las simulaciones numéricas (Mösso *et al.*, 1997) realizadas en estas condiciones, dando como resultado una corriente justo por encima de la depresión en la barra por donde derivaron las boyas.

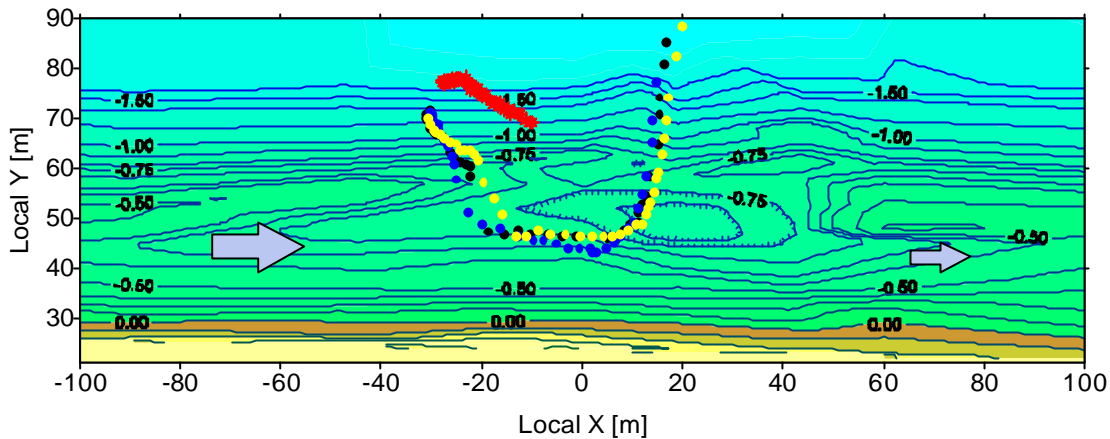


Figura 5.176.- Deriva de boyas lagrangianas sobre la depresión de la barra. Las flechas indican la diferencia en las corrientes longitudinales inducidas por la rotura del oleaje.

5.7.- Discusiones y Conclusiones de los Resultados Experimentales

A continuación se presentan las discusiones y conclusiones derivadas del análisis de los resultados experimentales llevado a cabo en esta tesis.

5.7.1.- Campañas de campo en la barra del Trabucador en el Delta del Ebro

Dada la importancia que las playas tienen para la sociedad, existe la necesidad de poder realizar predicciones adecuadas de su evolución, por lo que es necesario desarrollar herramientas numéricas predictivas, adecuadamente calibradas con datos experimentales de campo, que ayuden en la toma de decisiones adecuadas para una buena gestión de dichas áreas. A partir de aquí, hay tres consideraciones importantes.

- i. En el campo de la ingeniería marítima siguen habiendo una serie de incertidumbres sobre las relaciones entre los distintos fenómenos físicos que ahí tienen lugar.
- ii. En la práctica, el punto esencial de los estudios experimentales de campo, es la obtención de una serie de datos que permitan avanzar en el conocimiento del problema de interés y que puedan ser utilizados para contrastar las predicciones numéricas de los procesos que influyen en su evolución.

Por lo tanto, aún cuando las campañas de medidas en campo (y en particular, cuando se realizan en la zona de rompientes) involucran altos esfuerzos y costos, su realización se justifica por sí misma.

- iii. Por otra parte, una de las tareas esenciales de la ingeniería es la optimización de recursos, por lo que, para asegurar la rentabilidad de dichas campañas, éstas deben ser planificadas cuidadosamente, y de ser posible, afrontadas entre varias instituciones.

Delta'96 es un ejemplo de este tipo de experimentos de gran escala en la naturaleza, donde se aprovechó la experiencia previa de la campaña Delta'93. Para la optimización de los puntos y variables a medir, es aconsejable la realización de simulaciones numéricas previas y definir los puntos donde es más interesante la obtención de datos. Esto se realizó en el caso de Delta'96 (e.g. Rodriguez *et al.*, 1994 y Sánchez-Arcilla *et al.*, 1995), de donde, se mejoró la distribución vertical de sensores en el trineo (midiendo la componente 3D del flujo a 65 cm del fondo, y el flujo cerca del fondo), con respecto a los experimentos previos Delta'93.

Las mejoras de Delta'96 con respecto a Delta'93 se resumen a continuación:

- Medidas más completas: Se midieron olas y corrientes dentro y fuera de la zona de rompientes.
- En Delta'96 se utilizó un correntímetro S4DW (cedido por el CEDEX) colocado en un tetrapodo fondeado a una profundidad de 3.5 m, aproximadamente a unos 150 m de la línea de orilla, con lo que se obtuvieron series de tiempo de velocidades 2DH, así como series de presión (de donde se obtuvo el oleaje y las variaciones del nivel medio del mar durante la campaña).
- Dentro de la zona de rompientes se midió la estructura 3D del flujo, así como el flujo cerca del fondo. Otra diferencia con respecto a Delta'93 es que se instalaron 8 correntímetros en el trineo, 4 de ellos colocados en pares al mismo nivel (10 y 65 cm del fondo) para medir las componentes $u-v$ y $u-w$, permitiendo la identificación de la estructura 3D del flujo. Los correntímetros restantes fueron colocados a 5, 10, 25 y 100 cm del fondo para medir el perfil de velocidades horizontales, lo que permite obtener medidas cerca de la capa límite.
- Se midieron concentraciones de sedimento en suspensión cerca del fondo, utilizando 2 correntímetros y 2 turbidímetros colocados a 1 m de distancia entre sí, en los dos extremos del trineo y a una altura de 10 cm del fondo, midiendo las fluctuaciones de las concentraciones de sedimento en suspensión, relacionadas con el flujo. De esta manera, es posible cuantificar por separado tanto las componentes de las distintas escalas hidrodinámicas, como los mecanismos de transporte de sedimentos asociados a cada una de ellas.
- Además de los turbidímetros adosados al trineo, había trampas de sedimento portátiles y 5 trampas de sedimento fijas.
- Además de la estación meteorológica adosada al trineo, en Delta'96 se midieron las variables atmosféricas con una estación (cedida por el CEDEX) colocada en una torre a 10 m de altura y a 800 m de la zona de estudio.
- Se obtuvieron mas imágenes de video, a color (además de blanco y negro) y a una mayor altura (40 m). También se pudieron realizar algunas filmaciones zenitales con una cámara colocada en un globo hinchado con helio. Con estas cámaras se realizaron filmaciones durante la mayor parte de los tests, filmando tanto la dispersión de manchas de trazadores, como boyas lagrangianas. Esto

permitió comparar los coeficientes de dispersión obtenidos con las medidas de velocidades.

- Mayor duración de los experimentos. Se realizaron 45 tests durante los 10 días que duró la campaña, contra los 12 tests realizados durante los 6 días que duró Delta'93.

Aún cuando Delta'96 representó un avance cualitativo y cuantitativo con respecto a Delta'93, es interesante recalcar que hay aspectos de la campaña que deben ser reconsiderados para futuras campañas. A continuación se destacan algunos de estos aspectos:

- Delta'96 fue una campaña que tuvo una gran eficiencia en lo que a la obtención de datos se refiere. Se obtuvo un amplio conjunto armónico de datos meteorológicos e hidromorfo dinámicos de calidad de utilidad para el estudio de estos procesos (mejorar el conocimiento existente), así como para la calibración de modelos predictivos de procesos costeros.
- De los numerosos tests medidos en Delta'96, la mayoría responden a casos de circulación inducida por viento, complementando los datos previos obtenidos durante la campaña Delta'93 (donde las corrientes medidas fueron inducidas principalmente por la rotura del oleaje) y los del día 05/11 por la noche (tests 6 - 9) donde la rotura del oleaje ha operado como principal agente impulsor de la circulación. No obstante, durante la primera mitad de la campaña solo se obtuvieron datos de oleaje, pues debido a un fallo en el puerto serie del ordenador de adquisición, los datos de corrientes no se grabaron correctamente. Otro punto a destacar es que, aun cuando se registraron datos de corrientes inducidas por viento, el objetivo principal de la campaña Delta'96 era medir corrientes inducidas por la rotura del oleaje, que prácticamente fue inexistente durante la misma. El único episodio con oleaje importante se registró el día 5 de noviembre por la noche, con lo cual estas medidas no fueron complementadas con imágenes de video.
- En lo referente a las imágenes, éstas abarcaron un dominio muy amplio de la zona cercana a la costa (mayor que en Delta'93), pues las cámaras se colocaron a una altura de 40 m. La gran resolución temporal de las imágenes (50 Hz), permitió cuantificar con precisión oscilaciones de un rango de frecuencias muy amplio, así como la variación espacial de numerosos parámetros hidrodinámicos de forma uniforme, e incluso elaborar mapas de evolución. Al tratarse de medidas indirectas, filmadas a distancia, es posible medir en zonas difíciles, como la línea de orilla o zona de rotura, o bajo condiciones extremas como fuerte oleaje donde sería complicado colocar instrumentos. No obstante, las cámaras fueron colocadas de tal manera que el campo visual quedó inclinado (con la intención de aumentar el área filmada), por lo que, junto con el hecho de la deformación de las imágenes que provoca un lente “gran angular”, la restitución de coordenadas (control espacial), hecha 8 puntos fiduciales que no estaban uniformemente repartidos en el campo visual, fue una tarea difícil y laboriosa. Por otra parte, Las medidas indirectas requieren calibraciones con medidas directas para pasar la escala de intensidades a la correspondiente del parámetro medido como: concentración, nivel de superficie libre, etc.

Delta'96 representó, a la fecha de su realización, la mayor de las campañas de medidas en la zona costera llevadas a cabo en España.

5.7.2.- Turbulencia

5.7.2.1.- Medidas

La utilidad de las series temporales sobre las que se ha trabajado en el apartado de la turbulencia en la zona de rompientes (niveles de agua y velocidades) depende de una coordinación centralizada y clara de los diferentes aparatos de medida. El método de separación de escalas propuesto ha requerido, para su aplicación, medidas de correntímetros a una frecuencia de muestreo alta (20 Hz) y medidas de la elevación de la superficie libre a una menor frecuencia de muestreo (alrededor de 4 Hz).

Otro aspecto a destacar en cuanto a la metodología propuesta en esta tesis para la separación de escalas tiene que ver con las medidas del nivel de la superficie libre llevadas a cabo en la zona de rompientes. Cabe destacar que el sensor de alturas seleccionado (Etrometa) ha demostrado ser muy robusto y fiable, pero un aspecto a mejorar es su resolución espacial, que es relativamente baja (± 5 cm). Esta baja resolución ocasiona discontinuidades de 5 cm en las medidas de altura de ola, y por lo tanto, la "validez" de las velocidades verticales obtenidas a partir de las series de altura de ola utilizadas para el análisis espectral puede ser discutible.

5.7.2.2.- Metodología y Postproceso

Para encontrar la frecuencia de corte f_c que permitiera la separación de escalas se realizó un suavizado extra al efectuado por el mismo programa de análisis espectral (mediante media móvil), del espectro obtenido con los datos del sensor de altura de ola. La baja resolución espacial del sensor (separación mínima entre datos de niveles de agua de 5 cm), provocó que al efectuar la derivación de las velocidades verticales se obtuvieran valores muy grandes. Por lo tanto, los espectros obtenidos fueron muy poco realistas, con una mayor área bajo la curva que la de los espectros obtenidos con correntímetros, en las altas frecuencias, lo cual es físicamente imposible, ya que por la frecuencia de muestreo, en el espectro de velocidades queda incluida la energía correspondiente a altas frecuencias que no pudieron ser registradas por el sensor de oleaje. Por lo tanto, se llevó a cabo una interpolación lineal entre los registros del sensor de oleaje para obtener una serie suavizada de la que fue posible obtener un registro temporal de elevaciones de la superficie libre con una resolución espacial más adecuada para realizar el análisis espectral.

En lo referente al postproceso de los datos de flujo oscilatorio y de la macroturbulencia, el método propuesto para la determinación de frecuencias de corte ha probado su validez al comprobarse que las series de velocidades obtenidas cumplen con las

propiedades de la turbulencia. También cabe señalar que el postproceso de estas escalas involucra la aplicación (no trivial) de técnicas de filtrado digital, cuya aplicación es muy sensible a los parámetros de entrada del filtro y que condicionan de forma importante los resultados obtenidos.

5.7.2.3.- Resultados

El estudio de la turbulencia en la zona de rompientes sigue siendo un tema de investigación abierto, comenzando por la separación de escalas entre el flujo oscilatorio, macroturbulencia y turbulencia. La metodología propuesta en este trabajo para la separación de escalas parece adecuada de acuerdo con los resultados obtenidos, ya que la comprobación de la existencia de diferentes propiedades turbulentas en las series filtradas permitió validar esta técnica de medición de la turbulencia dentro de la zona de rompientes. Las medidas de las velocidades del flujo pueden ser mejoradas, ya que en la actualidad aparecen equipos cada vez más precisos capaces de medir a escalas espaciales y temporales más pequeñas (con frecuencias de muestreo muy altas). Sin embargo, no siempre es posible contar con dichos instrumentos, por lo que esta metodología de separación de escalas es una buena alternativa frente a la imposibilidad de contar con la última tecnología.

Las frecuencias en las que se separan las diferentes escalas hidrodinámicas no son valores fijos sino valores indicativos dentro del mismo orden de magnitud. Del análisis efectuado de las series de tiempo obtenidas en la campaña Delta'96, se han encontrado los siguientes valores para las frecuencias que separan las distintas escalas hidrodinámicas:

- Olas u ondas de viento: Aquellas con periodos superiores a un cierto valor $T_c = 1/f_c$, donde f_c es la frecuencia de corte calculada específicamente para separar la influencia de la macroturbulencia generada por la rotura del oleaje. En la práctica las series de niveles (medidas a 4 Hz) no están afectadas de forma importante por oscilaciones macroturbulentas, mientras que este no es el caso de las series de velocidad, donde se midió a 20 Hz. Las frecuencias de corte obtenidas quedaron en el rango [0.8 a 1.3 Hz].
- Turbulencia: Flujo con frecuencias oscilando entre la frecuencia mínima (frecuencia de Nyquist = 10 Hz) y una frecuencia de corte f_c .

En general, se las frecuencias de corte f_c encontradas que definen el límite entre la macroturbulencia y el flujo oscilatorio son más bajas [0.8 Hz a 1.30Hz], en comparación con las encontradas por Rodríguez (1997) en la campaña Delta'93 [1.11 Hz a 1.38 Hz]. Como consecuencia, la energía asociada a la turbulencia es mayor, puesto que hay energía de un mayor número de frecuencias incluida en el espectro, que si las frecuencias de corte hubieran sido más altas. De cualquier manera, los parámetros asociados a la turbulencia encontrados se corresponden bastante bien con las propiedades esperadas de la turbulencia en la zona de rompientes. Es importante tener en cuenta que para realizar el filtrado de la turbulencia se ha utilizado la misma frecuencia de corte para todas las series de velocidades, lo cual puede no ser del todo correcto ya que las velocidades se han tomado en puntos espaciales distintos. Una vez

demostrada la validez de la técnica desarrollada para la separación de la escala hidrodinámica turbulenta de la escala propia del oleaje, pueden llevarse a cabo diferentes estudios para conocer con más detalle la distribución espacial y las propiedades del movimiento turbulento dentro de la zona de rompientes (e.g. distribución vertical o en planta de las velocidades turbulentas).

Comparando la energía asociada al flujo oscilatorio y la de la turbulencia ($E_{\text{turb}}/E_{\text{oleaje}}$), se encuentran valores relativamente altos comparados con otros descritos en el estado del arte. Por ejemplo, Kuznetsov & Speranski (1990) encuentran valores de $E_{\text{turb}}/E_{\text{oleaje}} \approx 0.04$ (ausencia de rotura) y de $E_{\text{turb}}/E_{\text{oleaje}} \approx 0.14$ en rotura tipo *plunging*; George *et al.*, (1994) encuentra valores aún menores, de $E_{\text{turb}}/E_{\text{oleaje}} \approx 0.01$, mientras que Rodríguez (1997) encuentra valores de $E_{\text{turb}}/E_{\text{oleaje}} \leq 0.06$. En general, los resultados obtenidos en el análisis de datos de Delta'96 se encuentran valores que superan ligeramente los valores anteriormente señalados, alcanzándose un máximo de $E_{\text{turb}}/E_{\text{oleaje}} = 0.17$ para el test 08051120, y un mínimo de $E_{\text{turb}}/E_{\text{oleaje}} = 0.005$ para el test 05051634, debido probablemente a que el oleaje no estaba rompiendo (la altura de ola significativa durante dicho test fue de 16 cm). La diferencia observada entre los resultados de Delta'93 y Delta'96 puede explicarse en el hecho de que el oleaje fue sensiblemente menor durante la campaña Delta'96 donde prácticamente ningún test fue realizado en condiciones de rotura. Al tener tan poca energía asociada al oleaje, la importancia relativa de la turbulencia medida es mayor.

Con respecto a la escala temporal de la turbulencia τ , los valores obtenidos varían entre 0.005 segundos para el test 05041312 y los 0.1974 segundos del test 06051530. Estos valores son consistentes con las predicciones teóricas que sugieren valores de la escala temporal de la turbulencia de entre 10^{-1} y 10^{-3} s. Por otra parte, comparando los valores obtenidos de L/h , (método *ii*) obtenidos en Delta'96 con respecto a los de Rodríguez *et al.*, (1999) se observa que estos fueron superiores en la campaña Delta'93, que oscilaron entre 0.24 y 0.58, mientras que en el análisis de los tests de la campaña Delta'96, los valores varían entre 0.10 y 0.17.

La obtención de L a partir de su definición (método *i*) y a partir de la escala temporal de la turbulencia (método *iii*) también es sensiblemente menor en el caso de Delta'96. Estos resultados se pueden explicar en el hecho de que las condiciones energéticas durante la campaña Delta'96 fueron mucho más suaves que las que se presentaron durante la campaña Delta'93. De este análisis de la escala espacial de la turbulencia L , se destaca que los obtenidos con el primer método (basado en su definición) se basan completamente en datos experimentales medidos de las series de velocidades de los correntímetros y los valores son muy uniformes y son del orden de 1 cm. El segundo método se basa en una expresión basada en el trabajo de Rodríguez *et al.* (1999) en su análisis de la campaña Delta'93 (cuyas condiciones energéticas eran mayores que en la campaña Delta'96). Los valores que se obtienen con este método son un orden de magnitud mayores que los hallados con el primer método. Esto es esperable, ya que los coeficientes constantes de la ecuación [5.9] se obtuvieron con un oleaje sensiblemente mayor. Por último, el tercer método, que hace uso de la escala temporal de la turbulencia para estimar la escala espacial, tiene el inconveniente de las incertidumbres propias de la determinación de la escala espacial (particularmente las relacionadas con el límite superior de integración temporal). Por lo tanto, los valores de L , “acarrear” las incertidumbres y errores asociados a la obtención de la escala temporal τ .

Por lo que respecta a la distribución vertical de las intensidades turbulentas, las mayores intensidades se presentan en el tramo superior de la columna de agua, en la zona de aireación existente entre crestas y senos; por debajo de este nivel, las intensidades se mantienen prácticamente constantes. En importante, sin embargo, resaltar que esta afirmación proviene de la representación adimensionalizada de la estructura vertical de las intensidades turbulentas. Para esto es necesario tomar como valor el correntímetro superior que permaneció durante toda la serie por debajo del agua, es decir, que el calado existente puede ser ligeramente superior a la distancia al fondo del correntímetro superior sumergido. De este modo la escala vertical queda adimensionalizada (z_{CEM} / h) entre 0 y 1, y no se toma en cuenta la serie obtenida por los correntímetros que no entran en contacto permanente con el agua. Por lo tanto puede no estarse considerando toda la distancia de la columna del agua. Por su parte, la mayor disipación de energía tiene lugar también en esta misma zona superior (tal y como era de esperar). También es importante destacar que en las medidas de velocidades que se tomaron durante la campaña Delta'96 se utilizaron correntímetros colocados a diferentes profundidades aunque no sobre la misma línea vertical (ya que los correntímetros se colocaron en disposición helicoidal para evitar interferencias electromagnéticas entre ellos). Por lo tanto, para obtener las curvas de intensidad turbulenta o disipación vs. profundidad, se asume que las intensidades turbulentas obtenidas en disposición helicoidal serían las mismas que las medidas en una misma vertical.

Las intensidades turbulentas encontradas corresponden a las velocidades horizontales, pues se midieron velocidades verticales únicamente en dos puntos, a 10 cm (del equipo ruso) y a 65 cm del fondo. Una posibilidad para obtener las intensidades turbulentas "verticales" sería derivarlas a partir de las medidas de la superficie libre a través de una función de transferencia con la teoría adecuada. Esta es una línea de investigación futura.

Por lo que respecta a la energía cinética turbulenta, se puede observar que los métodos *ii* (utilizando las 3 componentes medidas) y *iii* (método estadístico) dan lugar a resultados muy similares (y menores, en comparación con el primer método descrito, donde se estima la componente vertical), lo cual no es extraño, ya que ambos métodos se basan en operar con las 3 componentes medidas de las velocidades turbulentas y no en la estimación de la energía cinética asociada a partir de la deducción teórica de la componente vertical de las velocidades turbulentas. Es importante recalcar que el primer método ha sido validado para condiciones de laboratorio, por lo que su aplicación para los datos de Delta'96 es sólo adecuada para valores de la energía cinética turbulenta relativamente bajos. Por otra parte, Flick & George (1990) en los experimentos llevados a cabo en las playas de La Jolla (Océano Pacífico) encontraron una cierta isotropía horizontal de la turbulencia al comparar las componentes de la intensidad horizontal, es decir, $u' \approx v'$. Analizando los datos obtenidos en las medidas de Delta'96, las componentes horizontales turbulentas presentan tendencias similares (aumento o disminución), pero no se puede afirmar que $u' \approx v'$.

La campaña de toma de datos Delta'96 se desarrolló en unas condiciones de débil oleaje. Esto provocó que varios de los espectros obtenidos en este análisis presentaran un pico de energía importante en el rango de las bajas frecuencias, y de una relativa menor cantidad de energía en el rango del flujo oscilatorio y las altas frecuencias (es

decir, no había una diferenciación marcada entre la energía contenida en las distintas escalas hidrodinámicas) por lo que no había un corte claro entre los espectros de energía. De aquí que sólo ha sido posible extraer resultados de los tests donde el oleaje era mayor.

Finalmente, por lo que respecta a la distribución en planta de las intensidades turbulentas, es de esperar que éstas presenten un aspecto similar a la distribución en planta de las corrientes longitudinales a la costa, con un valor máximo de intensidad justo después de la línea de rotura y un decaimiento progresivo hasta llegar a la costa. Como se pudo observar en los análisis de los resultados, la zona cercana a la línea donde rompe el oleaje es donde se presentan las intensidades turbulentas más altas. Un aspecto que puede resultar interesante, sobre todo para introducirlo en modelos numéricos, sería establecer, en función del tipo de rotura del oleaje (a través del número de Iribarren) una relación entre la energía cinética turbulenta y la distancia normalizada x/D , donde x es la distancia desde la línea de orilla hasta el punto de medida y D la distancia desde la línea de orilla al punto medio de rotura del oleaje. Para encontrar los valores de la distancia D podrían utilizarse las imágenes de vídeo tomadas durante la campaña Delta'96, simultáneamente a la toma de datos de velocidades.

5.7.3.- Transformación del Espectro del campo de oleaje y transferencia de energía a distintas escalas hidrodinámicas

5.7.3.1.- Medidas

Con el tipo de análisis realizado en este apartado (análisis de series de presión, series de alturas de ola y video) es posible encontrar algunos de los parámetros del oleaje más importantes en la dinámica de costas, como la transformación del espectro de energía, el ángulo de aproximación del oleaje, fracción de olas rotas, etc. Una aportación de la campaña Delta'96 es la obtención de todo el campo de oleaje en el dominio observado y la posibilidad de comparar las propiedades del oleaje en la zona cercana a la costa (próximo a romper), en la zona de rompientes y además en la zona de *swash*. Comparando el espectro "inicial", obtenido de la transformación de la serie de tiempo de la presión medido en la zona cercana a la costa, el espectro obtenido de las medidas de oleaje en la zona de rompientes y los obtenidos a través de la digitalización de las imágenes de video, se puede ver que en el proceso de propagación, el espectro del oleaje evoluciona, se descompone y transfiere energía del pico de máxima energía (e.g. 4.92 s) a un armónico que aparece al doble de frecuencia (e.g. 2.46 s). En algunos casos también se aprecian picos a frecuencias cercanas a 0.45 Hz, probablemente debidos a un oleaje local provocado por el viento en el momento de las medidas.

5.7.3.2.- Metodología y Postproceso: Análisis Espectral

Con respecto al análisis espectral, es importante ser cauteloso en la interpretación de la energía que aparece en la banda de bajas frecuencias, ya que si la resolución espectral

no es la adecuada, la cantidad de energía en dicha región puede ser subestimada. Para estudiar esta región con más detalle, se realizaron 2 procedimientos:

- i. Filtrado de la serie para eliminar las frecuencias del rango del oleaje de viento y turbulencia. La serie resultante tuvo fluctuaciones muy pequeñas con respecto a las frecuencias filtradas.

Debido a que el filtrado numérico es muy sensible a los propios parámetros de filtrado, en especial para la longitud de las ventanas y la frecuencia de corte, se llevó a cabo el segundo procedimiento.

- ii. Repetición del análisis espectral, incrementando la resolución en la región de bajas frecuencias, para lo cual se llevó a cabo un re-muestreo artificial de la serie a una frecuencia de muestreo (Δt) mayor que la original. De esta manera, se ganó resolución en el rango de las bajas frecuencias, pero como lo sugería el filtrado de la serie, no había más energía que la detectada en el primer análisis espectral.

5.7.3.3.- Resultados.- Oleaje en la zona cercana a la costa

La obtención del campo de oleaje a partir de las series de presión medidas con el S4DW fue realizada por el método de Grace (Bishop & Donelan, 1987), ya que la aplicación del método MLFM (*modified linear filter method*) producía picos espúreos en algunos puntos de la serie de oleaje obtenida (figura 5.34), lo que daba lugar a falsos picos de energía en el espectro del oleaje. Concretamente, en el caso de la serie de presión medida durante el test 04041127 se observa un pico de energía en una frecuencia correspondiente a un periodo de 3.36 segundos, que no está presente en el espectro de la serie de presión (Figura 5.35). Sin embargo, la precisión en la obtención del campo de oleaje a partir de medidas de la presión siempre será discutible. Según Homma, Horikawa & Komori (1966), aún existen ciertas incertidumbre en la expresión de donde se obtiene la altura de ola a partir de la presión, (ecuación [5.26]). Estos autores concluyeron que para olas con periodos menores a 5 s, el factor de corrección utilizado (obtenido a partir de la teoría de olas de pequeña amplitud) no era aplicable. No obstante, en el caso de los datos de laboratorio utilizados para la validación de la transformación empleada para los datos de Delta'96 tenían periodos cortos, y los resultados con el oleaje medido fueron bastante buenos. De tal manera que se considera que el oleaje obtenido a partir de los datos de presión medidos durante la campaña Delta'96 es fiable.

5.7.3.4.- Resultados- Imágenes de video

El tratamiento que se dio aquí a las imágenes de video se basó en la suposición de que la intensidad de luz solar fue constante a lo largo del test. Evidentemente si hay variaciones importantes de la luminosidad (e.g. paso de nubes) en el área de estudio durante las filmaciones, el valor del coeficiente de proporcionalidad en la relación entre

la intensidad en los pixels y la inclinación de la superficie libre también cambiará por lo que, en dichas condiciones, esta aplicación perdería validez.

Con respecto a la obtención del campo de alturas de ola mediante la técnica utilizada en este trabajo, no se puede considerar que el resultado es bueno. Comparando el espectro de energía del oleaje medido por el S4DW del tetrápodo y el obtenido por medio del análisis de las imágenes, hay una gran diferencia entre ellos, debido probablemente a que la “rugosidad” del agua debida al oleaje es relativamente mayor cuando el ángulo de filmación disminuye, es decir, cuando el análisis de las imágenes se realiza en un punto lejano de la cámara. Se considera que la inclinación óptima para aplicar este análisis a un punto remoto no debe superar los 45°.

En cuanto a la obtención del espectro de energía del oleaje en la zona de rompientes, el obtenido por medio del análisis de imágenes y el medido directamente por el sensor de oleaje del trineo presentan una excelente concordancia en cuanto a los picos energéticos, no así en la cantidad de energía contenida en ellos. El pico principal en el espectro del oleaje obtenido de las imágenes tiene menor energía asociada que el del sensor de oleaje, pero tiene mayor energía contenida en el rango de bajas frecuencias, donde se acentúan mucho los picos de energía del espectro de intensidades. Una de las posibles causas de este efecto es que la intensidad no se corresponde exactamente al nivel de superficie libre, sino que es función de la pendiente de ésta. Por lo tanto, la intensidad depende del número de onda, sobrestimando dicho nivel para ondas largas. Al realizar el análisis espectral aparece la altura de ola elevada al cuadrado, y la sobrestimación, genera un pico desmesurado. No obstante, los parámetros espectrales son muy similares, debido a que los picos coinciden y el contenido energético total en ambos espectros es casi idéntico. De acuerdo con estos resultados, es posible afirmar que con ambos métodos es posible obtener la cantidad de energía presente en el campo del oleaje y ondas de baja frecuencia⁵, pero, es posible que las imágenes sean más sensibles a pequeñas variaciones en las intensidades luminosas, es decir, que tengan mejor “resolución espacial” que el sensor de oleaje (cuya precisión es de ± 5 cm). Dado que es de esperar que las ondas infragravatorias tengan amplitudes muy pequeñas con respecto a su longitud de onda, cuando las amplitudes de estas ondas sean del orden de 5 cm, éstas serán imperceptibles al sensor de oleaje del trineo, mientras que las imágenes podrían detectarlo.

La precisión de los resultados obtenidos de las oscilaciones en la zona de *swash* es muy discutible. La digitalización realizada de estas oscilaciones sobre la playa fue “muy artesanal”, y los resultados del análisis espectral dependen enormemente de la frecuencia de muestreo (Δt) escogida en la digitalización. Otro aspecto que no se debe perder de vista es el hecho de que en la zona de rompientes y en la zona de *swash*, la espuma que se produce sobre el oleaje roto satura la intensidad en las imágenes, por lo que la calibración “intensidad – peralte” no se puede realizar. No obstante, esta técnica permite detectar la presencia de oscilaciones de frecuencias mas bajas que las del oleaje incidente, así como oscilaciones armónicas del pico principal, características de la transformación del oleaje durante el proceso de rotura.

⁵ Cabe recordar que en términos generales había muy poco oleaje en rotura (ya que las alturas de ola eran muy pequeñas), lo cual puede favorecer la reflexión y la generación de ondas de baja frecuencia.

5.7.3.5.- *Transferencia de energía a distintas escalas hidrodinámicas*

5.7.3.5.1.- Medidas

La transformación del oleaje que tiene lugar en la zona de rompientes es extremadamente compleja y aun existen muchas incertidumbres acerca de los procesos físicos que intervienen en su dinámica global. De hecho, no existe ninguna teoría ideal que describa esta transformación adecuadamente. Por lo tanto, resulta de gran utilidad la descripción y cuantificación de dicha transformación (geométrica y energética) en términos experimentales, lo cual es posible mediante el análisis espectral detallado de las series en el rango de frecuencias de interés.

El sensor de oleaje WG-Etrometa ha demostrado ser robusto y fiable, pero con la limitación de una resolución de ± 5 cm. Con este nivel de resolución es de esperar un error asociado que será tanto más grande cuanto menores sean las magnitudes del oleaje a medir. Buena prueba de ello se encuentra en el hecho que, a nivel energético, las mediciones tienen un error de cierre cercano al 10% (por lo que fue necesario normalizar las cantidades de energía obtenida espectralmente). Además, la frecuencia de muestreo de 4 Hz se presenta como totalmente insuficiente para medir la escala turbulenta. El sensor de oleaje no mide turbulencia, en contraposición a los correntímetros electromagnéticos que sí dan lecturas satisfactorias. En contrapartida, se trata de un instrumento indispensable para las mediciones en la zona de rompientes, puesto que sin él no se podría determinar la frecuencia de corte entre flujo oscilatorio y turbulencia.

5.7.3.5.2.- Metodología y Postproceso

Los remuestreos, es decir, la variación del intervalo de tiempo entre datos consecutivos, no son demasiado efectivos en la medición de energías, pues si bien se miden frecuencias menores con la consecuente ganancia en resolución espectral, cada uno de los datos continúa llevando asociada la energía de todas las escalas temporales. Es pues necesaria la combinación con un filtro digital que depure la aportación energética de las frecuencias no deseadas.

La corta longitud de las series de datos limita el estudio de las bajas frecuencias. El mayor periodo que se puede medir corresponde a la mitad de la longitud de la serie (con una incertidumbre muy alta). Para hallar este tipo de oscilaciones son necesarias series temporales más largas, que pueden tener menor frecuencia de muestreo sin pérdida substancial de información en el rango de las bajas frecuencias.

5.7.3.5.3.- Resultados

Para obtener la energía asociada al flujo oscilatorio de una forma lo más “depurada posible”, los análisis espectrales de las series de velocidades fueron realizados con las

series proyectadas sobre el ángulo de aproximación del oleaje, en lugar de realizarlas sobre el marco de referencia “longitudinal – transversal a la costa”. Este ángulo de aproximación del oleaje se obtuvo con el método de Madsen (descrito en Jiménez, 1997). En general, durante la campaña Delta’96 el oleaje se aproximaba con poca oblicuidad a la costa, obteniéndose ángulos de aproximación de 0° a 3° para 11 tests, de 4° a 5° para 7 tests, de 6° a 10° para 9 tests y de (un máximo) 11° para 2 tests.

Los porcentajes medios obtenidos correspondientes a cada escala hidrodinámica según el sensor de oleaje son: 1.6 % para bajas frecuencias (0.4 % mínimo a 3.192% máximo), 95.9 % para flujo oscilatorio (89.412% mínimo a 98.249% máximo) y 2.4 % para turbulencia (0.703% mínimo a 7.976% máximo). En el caso de los correntímetros, los valores medios son: 3.7 % para bajas frecuencias (1.263 % mínimo a 6.421% máximo), 86.1 % para flujo oscilatorio (50.911% mínimo a 98.064%) y 10.1 % para turbulencia (0.117% mínimo a 44.071 máximo). Las diferencias entre estos valores responden a las diferentes frecuencias de muestreo y a los diferentes niveles de resolución y precisión de los instrumentos.

Como recomendación para futuros estudios, cabe señalar que una campaña se debe planificar con conocimiento previo de los fenómenos que se quieren estudiar. En esta tesis se ha pretendido conseguir resultados en la escala de las ondas infragravitatorias, cuando las mediciones realizadas no permiten o hacen muy difícil ese proceso. En el caso de querer medir esa escala hidrodinámica, sería necesario tomar series temporales más largas (de unas 8 horas, por ejemplo) y podrían tener una frecuencia de muestreo mucho menor, del orden de 0.5 Hz, esto es, 1 dato cada 2 segundos en lugar de los 4 Hz o 20 Hz de Delta’96. Asimismo sería útil disponer de más instrumentos de medición en distintas posiciones en el eje *cross-shore* para tener suficiente resolución espacial como para medir los diferentes modos de ondas largas. Por otra parte, para una interpretación más detallada y correcta de los resultados, se recomienda el cálculo del tipo de rotura del oleaje así como el cálculo de la posición relativa del trineo respecto a la línea de rotura ajustando con sumo cuidado el índice γ . Conociendo estos dos parámetros, se puede estimar si las mediciones corresponden a olas que ya han roto o bien están por romper, factor que condiciona por completo su distribución de energía.

5.7.4.- Corrientes longitudinales

5.7.4.1.- Medidas

Las condiciones de oleaje presentes durante la campaña Delta’93 mostraron una cierta estacionariedad durante los tests 5 – 7 (caso II) y durante los tests 8 – 12 (caso III):

- Caso II: situación de energía moderada, cuasi estacionaria, proveniente del SE y con un espectro de energía estrecho con un pico principal correspondiente a un periodo de pico de 6.6 s, y pequeños picos secundarios para períodos de 18.3 s y 5.1 s. La altura de ola significativa H_s promedio fue aproximadamente constante, y entorno a 0.7 m.

- Caso III: disminución del nivel de energía, proveniente del SE y con un espectro de energía estrecho con un pico principal correspondiente a periodo de pico de 5.5 s a 7 s. La altura de ola significativa promedio fue entorno a 0.5 m.

La condición de estacionariedad ha permitido considerar a dichos tests como medidas individuales en distintas posiciones a lo ancho de la zona de rompientes para un mismo caso de oleaje. La distribución vertical de los correntímetros ha permitido verificar la estructura Q3D del flujo en cada posición de medida.

Los resultados de las corrientes muestran aspectos interesantes respecto a supuestos usualmente asumidos para la zona de rompientes. Con respecto a la estructura vertical de las corrientes longitudinales medidas en los experimentos Delta'93 se contradice el supuesto de perfiles verticales cuasi uniformes (e.g. Svendsen & Lorenz, 1989) mostrando la aceptabilidad de la hipótesis de perfiles logarítmicos como fue previamente presentado por Rodriguez *et al.* (1994) y verificado posteriormente en los experimentos DUCK'94 (Thornton *et al.*, 1995). La distribución en planta de estas corrientes tampoco muestra su máximo en la cresta de la barra sumergida, sino que la posición del máximo varía en función del tipo de oleaje en rotura, desplazándose hacia el seno del perfil transversal.

5.7.4.2.- Resultados

De la comparación de las alturas de rugosidad k_w experimentales y teóricas se infiere que la mejor predicción para el coeficiente de fricción, es claramente la obtenida considerando el efecto de las formas de fondo (*ripples*), mientras que para las alturas de rugosidad, la mejor predicción es la que se tiene al considerar el efecto de las formas del fondo y el transporte de sedimentos.

Para los coeficientes de fricción, se ha observado que las predicciones de f_{wc} y f_c también mejoran sustancialmente si la altura de la rugosidad del fondo, k_n , se estima mediante las expresiones que consideran la fricción adicional por formas de fondo y el transporte de sedimentos, lo cual es esperable, puesto que los coeficientes de fricción y las tensiones de corte que se generan en el fondo (expresadas por la velocidad de corte) están físicamente muy relacionadas.

No obstante, es necesario señalar, que estas fórmulas empíricas de k_n y f_{wc} deben ser utilizadas con cautela ya que son ajustes de validez restringida a las condiciones para las cuales fueron obtenidas y diferentes para casos de campo o laboratorio (e.g. ajustadas con $u_{orb}^{1/3}$ en lugar de $u_{orb-rms}$ para los casos de campo). Otro punto que es importante señalar es que los ajustes logarítmicos de las velocidades, aún cuando tienen unos coeficientes de correlación bastante altos, (entre 0.89 y 0.999), están basados en un reducido número de grados de libertad (dado que no todos los correntímetros estaban sumergidos completamente durante los distintos tests a lo largo de la zona de rompientes). De aquí que los resultados obtenidos de la rugosidad del fondo deban ser tomados con cierta cautela. De hecho, los valores de la rugosidad del fondo obtenidos a partir del ajuste logarítmico del perfil de velocidades muestran una dispersión muy alta dentro de la zona de rompientes, con valores comprendidos entre 0.04 a 6.4 cm.

5.7.5.- Evolución batimétrica a corto término en la Barra del Trabucador bajo condiciones de baja energía

En este punto se han estudiado los cambios morfológicos producidos en la barra del Trabucador durante las campañas Delta'93 y Delta'96 junto con los mecanismos hidrodinámicos ocurridos. Para tal fin, se han analizado un amplio conjunto de datos topo-batimétricos, de velocidades de viento, corrientes y de alturas de ola. Las conclusiones obtenidas se han resumido haciendo una comparación entre lo ocurrido durante ambas campañas.

5.7.5.1.- Mecanismos impulsores en Delta'93 y Delta'96

5.7.5.1.1.- Viento

Durante Delta'93, las condiciones atmosféricas fueron medidas en la estación de Sant Carles de la Rápita, en la que se observó una actividad poco intensa, con ráfagas puntuales máximas de 3.5 m/s, y con una media de 1.6 m/s. La dirección experimentó variaciones durante la campaña, pero durante el periodo de mayor intensidad fue predominantemente SW. Éstas bajas intensidades del viento durante los experimentos permiten descartar la influencia del viento como agente impulsor durante los tests realizados el día 16 de diciembre; así, la circulación medida en la zona de rompientes con el trineo fue originada casi exclusivamente por la rotura del oleaje.

En general, durante la campaña Delta'96 el estado de mar fue de oleaje débil con viento medianamente intenso distribuido en forma de brisas diurnas. En particular, el día 5 de noviembre se produjeron dos estados denominados “de viento dominante” al mediodía y tarde, alcanzándose valores de 12 m/s para el viento medio, y “de oleaje dominante” (las rachas de viento no superaron los 5 m/s) durante la tarde y noche, con alturas de ola significativa próximas a los 0.7 m. La dirección del viento fue prácticamente constante y procedente del N-NW (en torno a los 330° respecto del N).

5.7.5.1.2.- Oleaje

El oleaje registrado por la boya de la barra del Trabucador (a una profundidad de 7.5 m) durante la campaña Delta'93 alcanzó una altura de ola significativa máxima de $H_s = 86$ cm por la mañana, descendiendo a 80 cm durante el medio día y hasta llegar al mínimo registrado de 60 cm a última hora de la tarde, durante el test 12161651. El periodo de pico se mantuvo razonablemente constante y alrededor de 6 s y fue predominantemente del sur (aproximadamente 178° del N, lo que equivale a un ángulo de 54° entre el frente de onda con respecto a la línea de orilla). Con respecto al trineo, este cubrió una distancia cercana a los 40 m en dirección transversal a la costa por unos 10 m en dirección longitudinal a la misma, alcanzado profundidades superiores a 1.2 m

(para los tests 12161004 y 12161407). El máximo de H_s (0.71 m) registrada en el trineo fue para el primer test (12161004) y la mínima, registrada (0.27 m) fue durante el último test (12161651) lo que representa una variación de 44 cm. El periodo de pico durante estas medidas fue de entre 6 y 8 s, mientras que el periodo medio estuvo en torno a los 2.2 s. La dirección registrada fue mayoritariamente del SE (alrededor de 135° respecto al N, lo que representa 11° con respecto a la línea de orilla), evidenciando la refracción experimentada por el oleaje con respecto a los datos de la boya del Trabucador.

Para la campaña Delta'96 no se colocó la boya del Trabucador, por lo que se analizaron los datos proporcionados por la boya de Cap Tortosa, colocada frente al Delta del Ebro, a una profundidad aproximada de 50 m. La altura de ola significativa durante la campaña presentó un rango de variación de casi 90 cm, alcanzando valores de H_s cercanos a 1 m por la mañana y noche del día 5 de noviembre. Por la tarde la altura de ola registrada estuvo en torno a 0.7 m. No obstante, durante la mañana, los valores de H_s no superaron los 10 cm. El periodo de pico presentó valores de 3 s entre las 3 y 18 horas del día y de 7.1 s entre las 18 y las 24 horas. La dirección predominante durante la mayor parte del día fue del NW (330° respecto del N). Posteriormente varió su ángulo de aproximación a 0° (Norte) y durante la noche cambió a E-NE, aproximadamente a 80° respecto al N. Con respecto al trineo, las medidas realizadas durante el día 5 abarcaron una distancia aproximada de 30 m a lo ancho de la zona de rompientes, hasta una profundidad máxima de 1.5 m. La altura de ola significativa medida este día presentó una variación de 42 cm, con un valor mínimo de 21 cm (test 05051634) y un valor máximo de 63 cm (test 05072242). El periodo de pico presentó un valor cercano a los 6 s durante el día, aumentando a 8 s por la noche. El periodo medio registró una variación similar, de 2.2 s en la mañana a 3 s por la noche. La dirección del oleaje registrada por la noche (aunque con pequeñas oscilaciones) es del E-SE. Las direcciones registradas en el trineo difieren bastante de las medidas por la boya de Cap Tortosa (oleaje proveniente del NW), debido probablemente a que la zona de medidas se encuentra abrigada para oleajes del Norte.

5.7.5.1.3.- Corrientes

En la campaña Delta'93, las velocidades longitudinales medidas en el trineo fueron siempre en sentido norte (positivas, según el sistema de referencia), mientras que las transversales a la costa fueron principalmente en sentido *offshore* (negativas, según el sistema de referencia), salvo para el test 12161205, donde se registraron velocidades en dirección a la costa en el correntímetro más cercano a la superficie. La máxima velocidad en sentido *offshore* fue de casi 35 cm/s, medida con el correntímetro más próximo al fondo durante el test 12161055. En general, se puede ver que la magnitud de la velocidad transversal fue reduciéndose conforme aumentaba la distancia con el fondo. La oblicuidad mostrada por el oleaje, indujo una fuerte corriente longitudinal (con velocidades cercanas a los 90 cm/s) y un claro flujo de resaca (*undertow*) con velocidades mayores a 30 cm/s. En general, la magnitud de las velocidades longitudinales obtenidas fue mayor que el doble de las velocidades transversales.

En la campaña Delta'96, las corrientes (para el 5 de noviembre), fueron obtenidas a partir de los periodos de 5 minutos con mayor altura de ola media cuadrática H_{rms} de las series temporales de 30 minutos. Se ha encontrado que, tanto las corrientes paralelas

como las perpendiculares a la costa durante el día 5 de noviembre de 1996 fueron menos intensas que las del 16 de diciembre de 1993. Durante los tests de la mañana, las velocidades fueron prácticamente nulas, mientras que por la noche, aumentaron alcanzándose valores próximos a 25 cm/s en el correntímetro situado a 65 cm del fondo. Es interesante notar que el perfil de velocidades de los tests nocturnos del día 5 de noviembre presentan una forma parabólica, con el máximo localizado a 65 cm del fondo y con sentido hacia el sur (velocidades negativas). Las velocidades transversales fueron mayoritariamente en sentido *offshore*, y al igual que las corrientes longitudinales, fueron mayores en los tests nocturnos, alcanzándose un máximo de 14 cm/s en los correntímetros situados a 5 y 100 cm del fondo.

A pesar que en ambas campañas el oleaje incidente procedió del 2º cuadrante (SE), durante los experimentos Delta'93 se produjeron corrientes longitudinales hacia el norte exclusivamente, mientras que en los experimentos Delta'96 fueron predominantemente hacia el sur. Esto es debido a la orientación de la línea de orilla en la barra del Trabucador (forma unos 34º respecto el N).

5.7.5.2.- Variaciones batimétricas

Durante las campañas Delta'93 y Delta'96 se realizaron numerosos perfiles batimétricos antes y después de las medidas hidrodinámicas. Para Delta'93 se analizaron 11 perfiles tanto para el día 13 como para el día 17 de Diciembre de 1993. En algunos de ellos es posible apreciar la aparición de una pequeña protuberancia (como una incipiente barra) de unos 25 cm de altura, aproximadamente a 27 m de la línea de orilla. No obstante, esta situación no es uniforme a lo largo de la zona estudiada (perfiles $x = 0$, $x = 120$ y $x = 355$). Otra característica interesante se observa en el perfil $x = 90$, donde había una depresión de cerca de 1 m a una distancia aproximada de 42 m de la línea de orilla. El perfil tomado después de la campaña se ha suavizado y no presenta esta depresión. En general, durante los experimentos Delta'93 la erosión producida en los perfiles topográficos situados más al norte es mayor que en los situados más al sur (lo que puede ser un indicativo de la dirección del transporte de sedimentos hacia el sur), a pesar de que las corrientes longitudinales medidas en el trineo van hacia el norte. Esto puede ser debido a que los datos de velocidades obtenidos en el trineo fueron tomados en un tramo de aproximadamente 15 m de longitud paralela a la costa, mientras que los perfiles abarcan más de 400 m de distancia longitudinal, siendo el transporte longitudinal de sedimento a lo largo de la barra del Trabucador predominantemente hacia el sur. Esto es un claro indicativo de las no-uniformidades longitudinales en la playa del Trabucador. Esta diferencia de tasas de transporte pudieron deberse a la existencia de un mayor flujo de resaca en los perfiles situados más hacia el norte que llevaron el sedimento en dirección *offshore*.

Para la campaña Delta'96 se analizaron 12 perfiles (de manera similar al análisis anterior) tomados el 30 de octubre y el 9 de noviembre, antes y después de los experimentos hidrodinámicos. Algunos de los perfiles analizados tienen una mayor longitud, puesto que se realizaron medidas con la zodiac a mayor profundidad que los perfiles adyacentes. Los perfiles tomados durante la campaña muestran claramente la existencia de una barra sumergida a unos 130 m de la costa, cuya cresta estaba aproximadamente a 2 m de profundidad, mientras que el seno de la barra se situaba

aproximadamente 20 m más cerca de la línea de orilla, y estaba aproximadamente a 3 m de profundidad. En algunos perfiles del día 9 de noviembre ($x = -90$ y $x = 60$) se muestra una pequeña protuberancia (inexistente al inicio de la campaña) aproximadamente a 1 m de profundidad (distancia aproximada de 27 m de la línea de orilla). Esto también se aprecia en los perfiles $x = 20$ y $x = 40$, solo que en este caso, la protuberancia se situó 10 m y 15 m más lejos de la línea de orilla que la mencionada anteriormente, mostrando una cierta tendencia de transporte transversal de sedimentos en dirección *offshore*. En términos generales, en los perfiles topográficos obtenidos en la campaña Delta'96 la erosión y la acreción fueron similares, aunque puede observarse una cierta tendencia al transporte de sedimentos en dirección *offshore* en la mayoría de perfiles. Esto sería consecuencia de las corrientes transversales, las cuales incluso llegaron a romper la zona central de la barra.

En líneas generales, se puede observar que, aunque a lo largo de las campañas Delta'93 y Delta'96 se han producido episodios de baja energía (la altura de ola significativa estuvo entorno a los 45 cm), los cambios morfológicos han sido significativos (hasta 50 cm de variación de cota) a una escala temporal de corto plazo.