

TRATAMIENTOS MASIVOS DE DATOS PROCEDENTES DE LA INSTRUMENTACIÓN DEL DIQUE DE BOTAFOC (IBIZA)

JOSÉ LUIS ALMAZÁN GÁRATE

Dr. Ing. de Caminos, Canales y Puertos

Universidad Politécnica de Madrid

ÁNGEL MATÍAS MATEOS

Ing. de Caminos, Canales y Puertos

Director de la Autoridad Portuaria de Baleares

M. CARMEN PALOMINO MONZÓN

Dra. CC. Físicas

Universidad Politécnica de Madrid

JOSÉ RAÚL GARCÍA MONTES

Dr. Ing. de Caminos, Canales y Puertos

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos

JOSÉ RAMÓN AMORÓS SERRET

Ing. de Caminos, Canales y Puertos

Centro de Estudios de Puertos y Costas (CEDEX. Ministerio de Fomento)

1. INTRODUCCIÓN.

El análisis de las diferentes estrategias de tratamiento de los datos brutos ofrecidas por las modernas instrumentaciones, y la dilatada experiencia en este campo del equipo técnico que redacta este artículo, ha permitido desarrollar y optimizar metodologías de tratamiento de la señal bruta de presiones registrada por los sensores instalados en el cajón número 8 del Dique de Botafoc (Ibiza). Además, gracias al desarrollo de estas nuevas herramientas, se han podido analizar aspectos relevantes en la interacción oleaje-estructura, que, aunque ampliamente descritos de forma teórica por la ingeniería portuaria, se ven ahora confirmados con claridad en medidas tomadas en la naturaleza y no en un laboratorio de experimentación.

La instrumentación instalada en el Dique de Botafoc en el año 2002 cuenta con dos secciones idénticas. En cada una de las secciones instrumentadas se instalaron doce sensores de presión y subpresión, ubicados en los tres paramentos en contacto con el agua a diferentes cotas, tal y como se muestra en la figura 1, 7 sensores en el paramento vertical entre las cotas $-12,00$ m. y $+5,00$ m., 4 sensores de subpresión, y otro sensor adicional en el paramento abrigado y a cota $-4,00$ m. para medir la presión hidrostática real y de la eventual agitación interior presente en la dársena abrigada.



Figura 0. Situación del cajón instrumentado en el Dique de Botafoc (A.P de Ibiza).

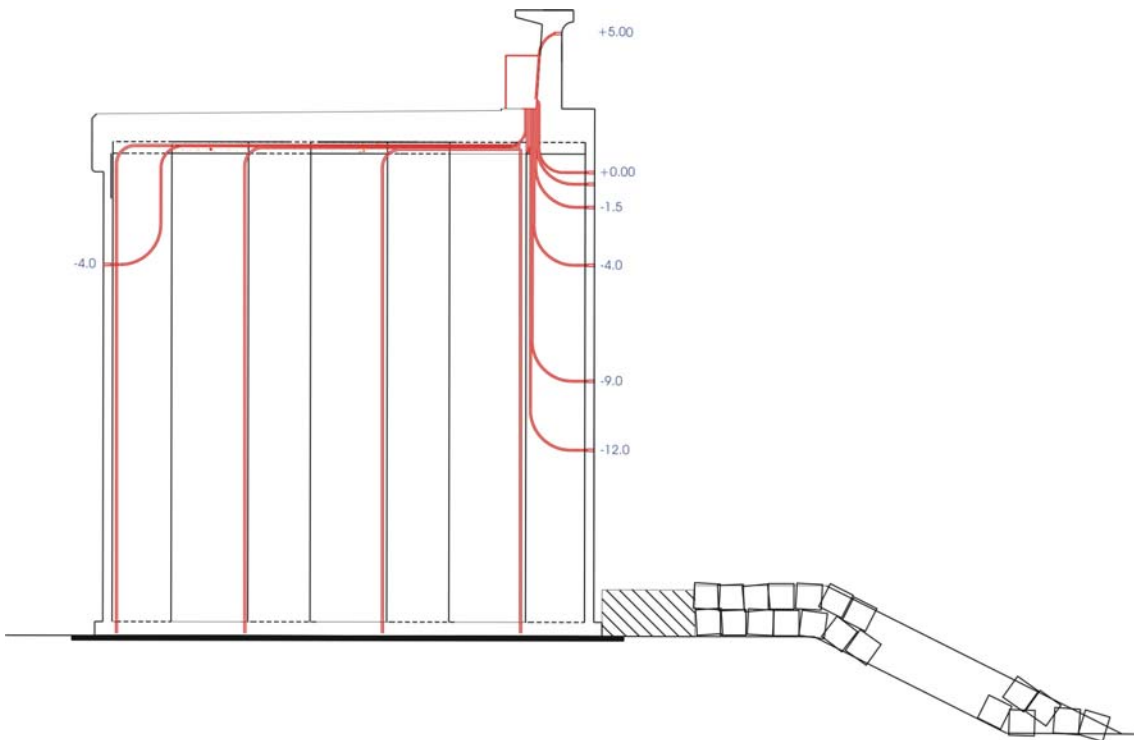


Figura 1. Sección instrumentada con doce sensores de presión y subpresión.

2. DESARROLLO DE HERRAMIENTAS ESPECÍFICAS DE ANÁLISIS.

Esta instalación ha venido funcionando, ininterrumpidamente, desde el año 2003, lo que unido a la alta frecuencia de muestreo (actualmente 65 Hz y con posibilidad de muestrear hasta a 200 Hz) arroja una cantidad ingente de datos que ha habido que procesar y tratar para conseguir el objetivo buscado, que, en una primera etapa, consiste en analizar los máximos estados de presiones a los que el cajón ha estado sometido, estudiar la estabilidad del cajón en estos casos extremos, y comparar esto con los límites de diseño previstos en el proyecto (presiones ejercidas por la ola de cálculo). Ello ha dado lugar al desarrollo y optimización de varios métodos de análisis que se presentan en esta comunicación y que se pueden resumir en:

- Análisis de Fourier sobre una muestra significativa de cada sensor. Este análisis se realiza para determinar la bondad de los datos y la cantidad de “ruido electrónico” introducido en la señal, y tras el mismo se decide la utilización, o no, de la señal dada por el sensor en el cálculo de las leyes de presión del cajón.
- Filtrado de la señal bruta recogida por los sensores. Este filtrado se realiza con un sistema de media móvil sobre la señal recogida, y produce un aplanamiento de la señal eliminando las oscilaciones sobre el nivel de base de dicha señal. El filtrado es aplicado para estudiar la evolución del nivel de base con vistas a obtener estadísticas de la señal (media, niveles máximos y mínimos, etc), no pretendiéndose con ello obviar los datos reales recogidos por los sensores, ya que estos pueden registrar otros fenómenos de frecuencia mucho mayor a la del oleaje (estallidos de burbujas, presiones impulsivas, etc). De esta forma el dato original siempre se conserva..
- Muestreo y cálculo de estadísticas en continuo de la señal. Con un programa desarrollado al efecto, se puede realizar un muestro de forma continua y automática, es decir, se calculan estadísticas de la señal de un sensor (media, máximo, mínimo, pasos por cero y periodo de la onda, etc) cada X segundos a lo largo de un periodo importante (días, semanas o meses completos).

Para la realización de estos nuevos análisis se han compilado y desarrollado las herramientas informáticas adecuadas. A continuación se ofrecen algunas demostraciones de análisis realizados con ellas sobre datos reales recogidos por la instrumentación.

2.1. Análisis de Fourier.

Para cada sensor, y sobre un muestra significativa de 15 minutos de registro bruto, se analiza el espectro de frecuencias a partir de la transformada rápida de Fourier (FFT). Posteriormente, y en el caso de aquellos sensores que muestren un pico de energía alrededor de las frecuencias típicas del oleaje en el espectro, se calcula la relación señal ruido, aplicándose un criterio de aceptabilidad.

El espectro de frecuencias a partir de la FFT se limita entre los 0.1 Hz (correspondientes a señales de 10 segundos de periodo) y 1 Hz (correspondientes a señales de 1 segundo de periodo), siendo estos límites los que engloban al oleaje típico existente en la zona de Ibiza.

Tras este análisis, y en caso de que el sensor registre presiones debidas al oleaje, se obtiene un espectro como el mostrado en la figura 2, en el que se puede apreciar como la densidad espectral es mucho mayor en las frecuencias del oleaje (en el caso de la gráfica mostrada alrededor de la frecuencia 0.13, correspondiente a una oleaje de algo menos de 8 segundos).

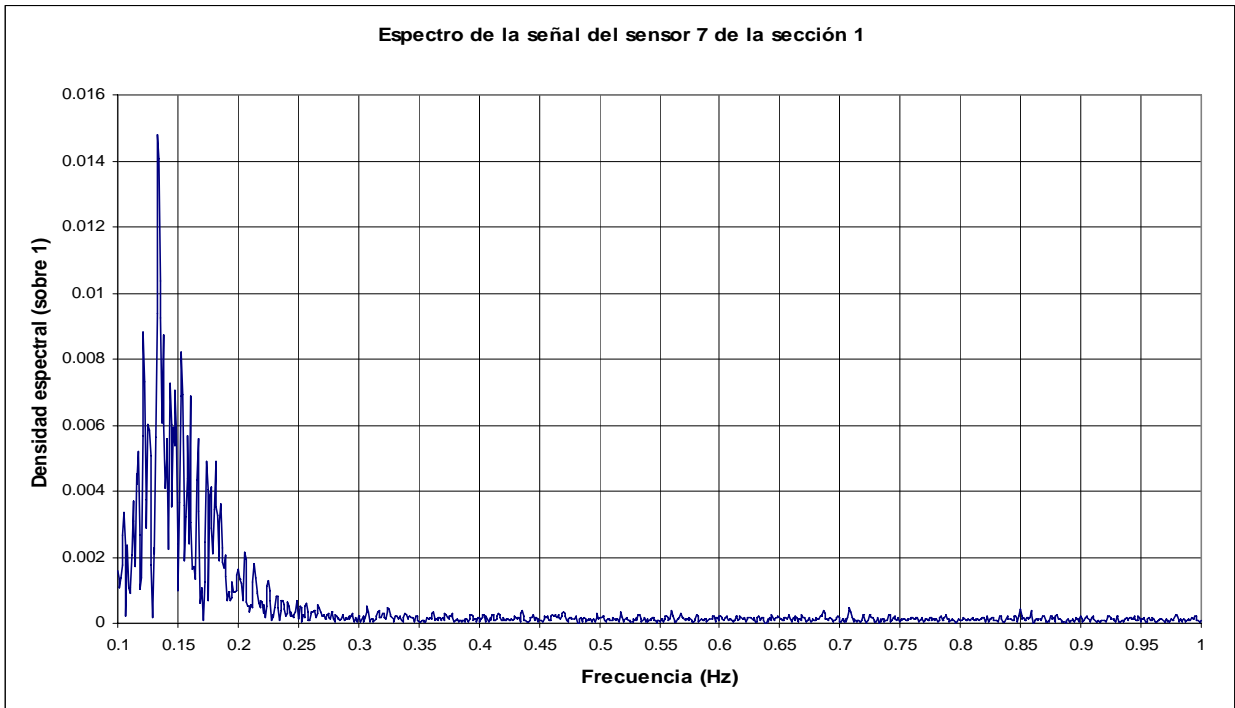


Figura 2. Espectro obtenido a partir de la FFT con presencia de oleaje.

En caso de que el sensor no haya registrado perturbaciones debidas al oleaje a la profundidad de instalación, no existen picos de densidad espectral cercanos a las frecuencias propias del oleaje, como es el caso de la Figura 3.

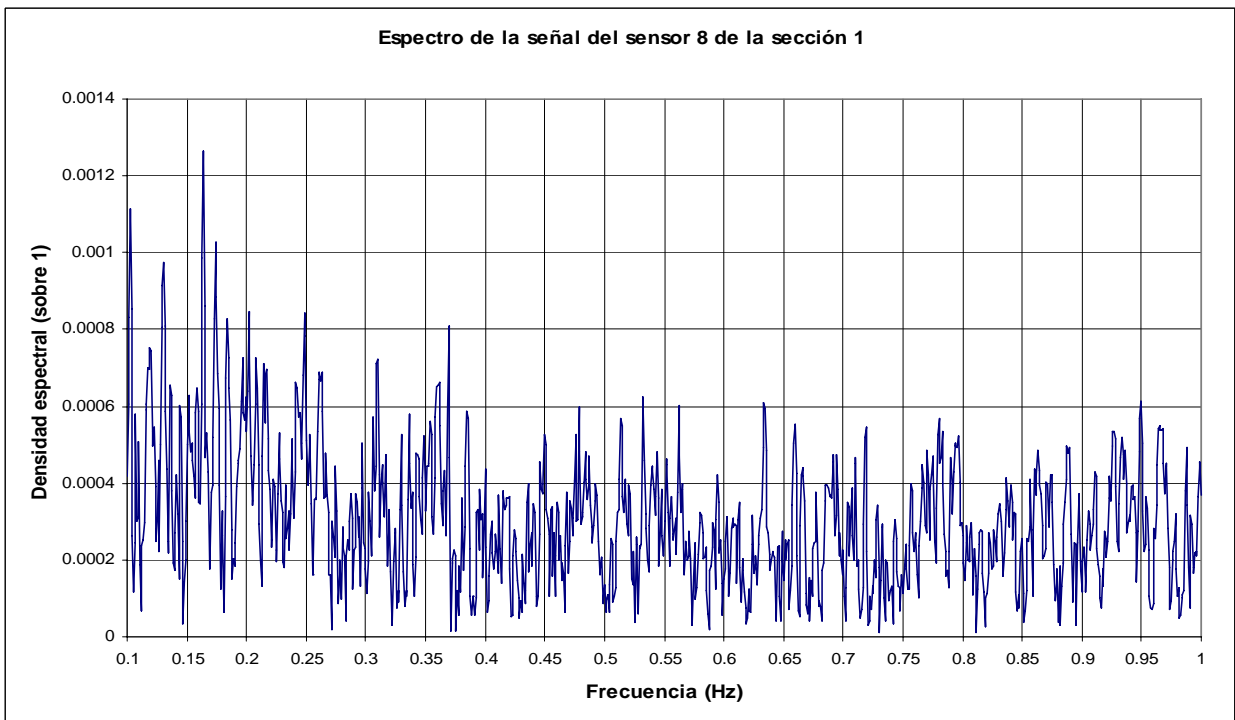


Figura 3. Espectro obtenido a partir de la FFT sin presencia de oleaje.

Tras verificar que sensores, efectivamente, están registrando presiones debidas al oleaje, se procede a calcular la relación señal-ruido en decibelios en la banda de frecuencias cercanas al

oleaje con respecto del resto de la gráfica. Actualmente, para el análisis de la estabilidad del cajón, se están considerando adecuadas señales con una relación señal-ruido mayor de los 20 dB.

En la Figura 4 se muestra una gráfica correspondiente a una señal aceptable con una relación señal-ruido de mas de 30 dB.

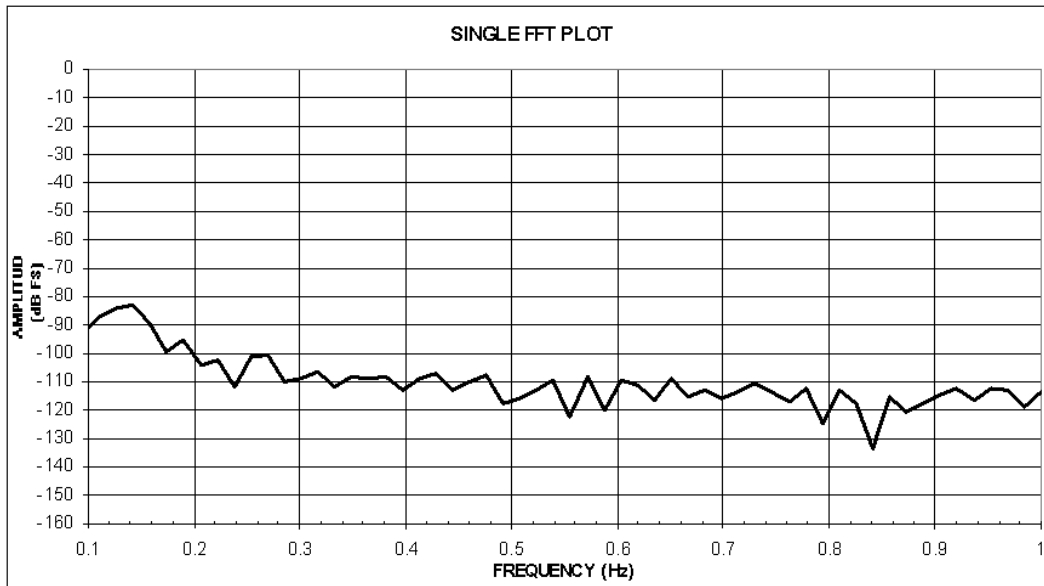


Figura 4. Espectro obtenido a partir de la FFT. Relación señal-ruido.

2.2. Filtrado de la señal bruta.

El filtrado es aplicado para estudiar la evolución del nivel de base con vistas a obtener estadísticas de la señal (media, niveles máximos y mínimos, etc). En cualquier caso, la señal original es conservada para estudiar otros fenómenos de frecuencia mucho mayor a la del oleaje (estallidos de burbujas, presiones impulsivas, etc) y que se pierden en el proceso de filtrado.

El filtrado se realiza con un sistema de media móvil sobre la señal recogida, y produce un aplanamiento de la señal eliminando las oscilaciones sobre el nivel de base de dicha señal.

La Figura 5 muestra una gráfica en donde se aprecian: la señal original (en magenta), y las curvas de tres filtrados (primer filtrado en negro, segundo filtrado en rojo, y tercer filtrado en azul). La escala horizontal muestra datos a 65 Hz, de forma que cada 65 datos corresponden a 1 segundo de señal. La Figura 6 muestra ampliada la misma curva y permite apreciar como actúa el programa de filtrado.

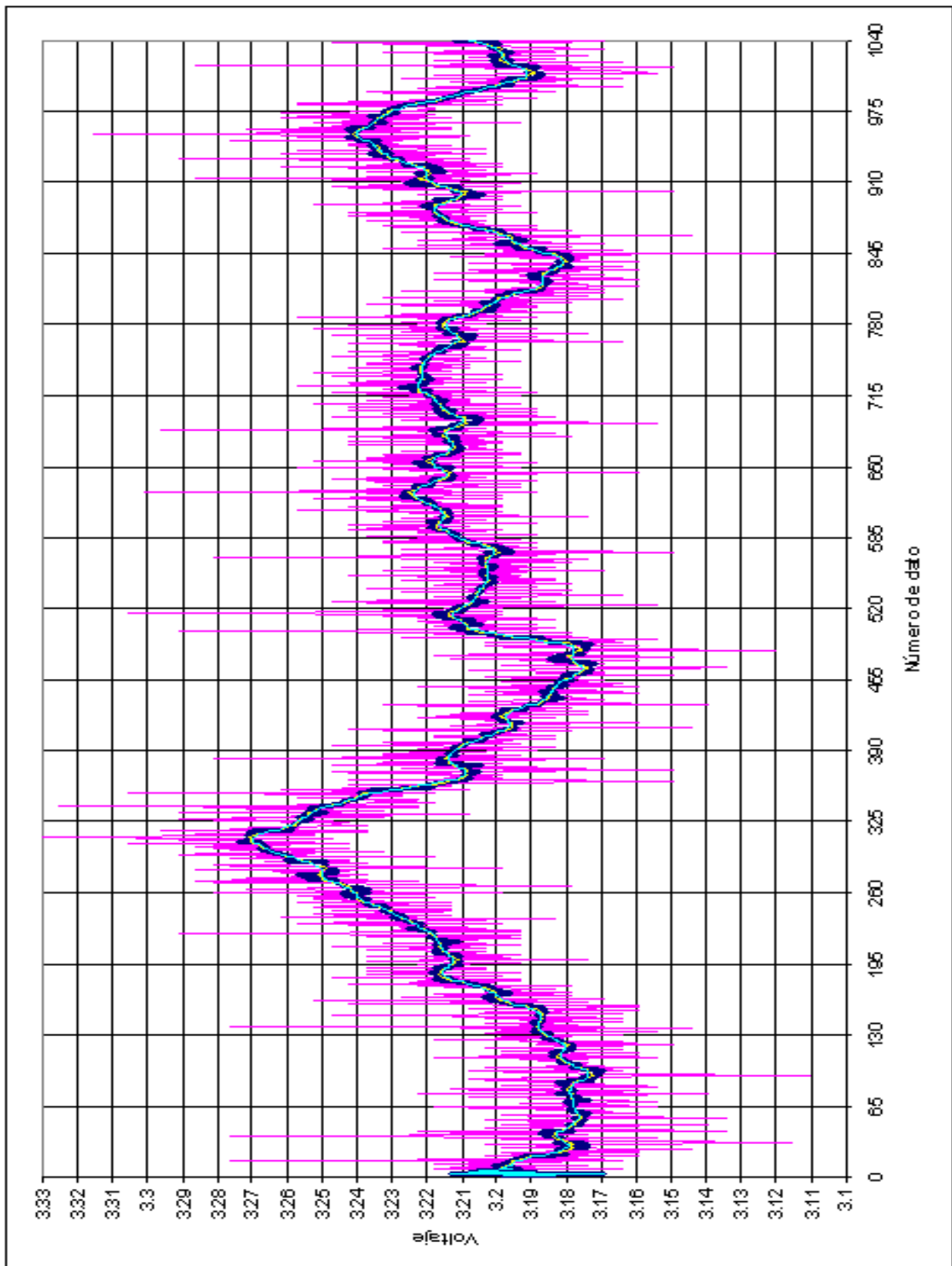


Figura 5. Filtrado con media móvil.

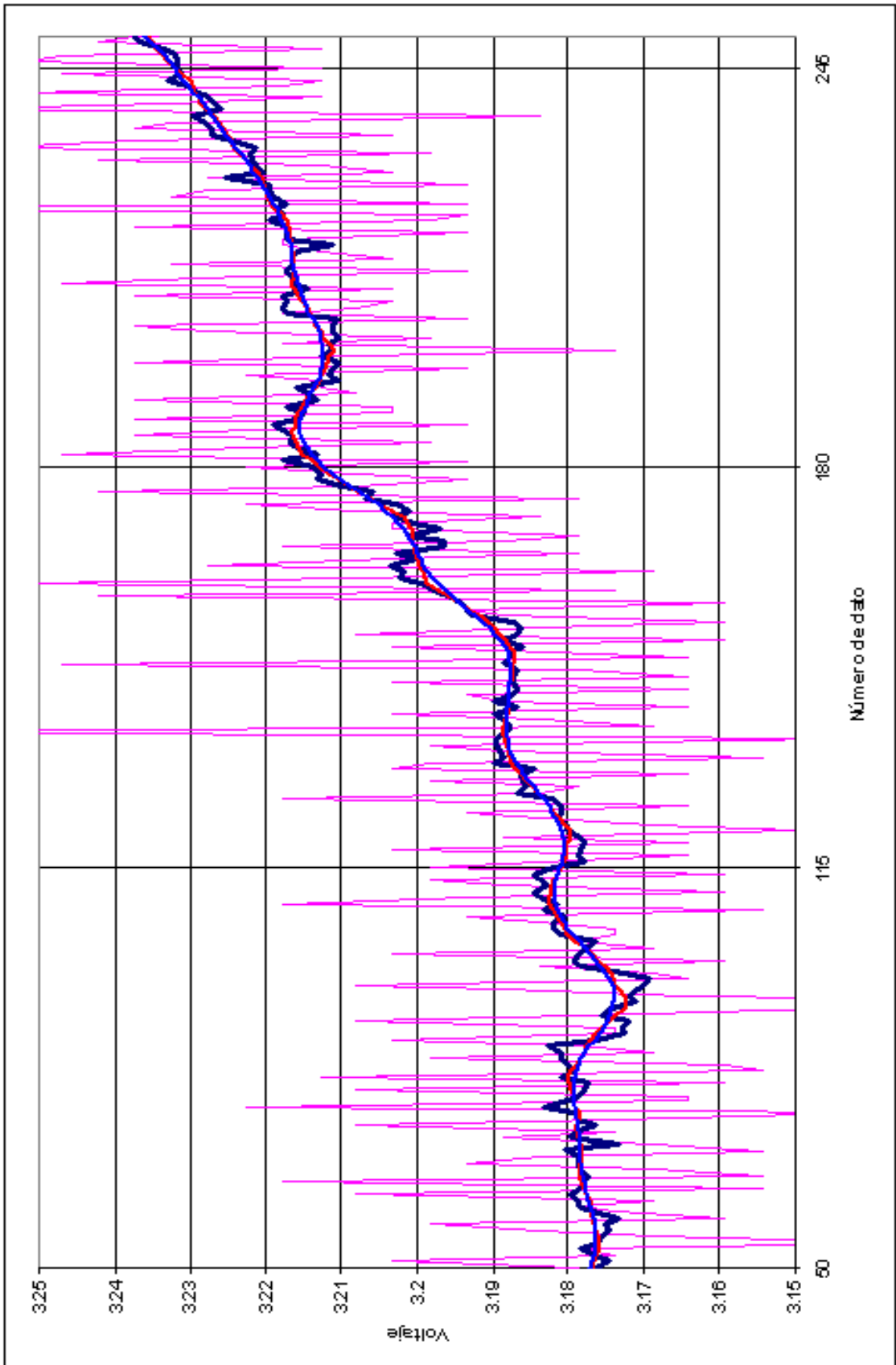


Figura 6. Filtrado con media móvil. Ampliación.

2.3. Muestreo y cálculo de estadísticas.

Otra nueva aplicación desarrollada permite realizar el muestreo de forma continua y automática, pudiéndose así extender el análisis a un mas amplio periodo de tiempo o, incluso, a la totalidad del periodo de medida. De esta forma, se calculan una serie de estadísticas de la señal de un sensor, tal como media, máximo, mínimo, pasos por cero y periodo de la onda, etc, cada cierto número de segundos a lo largo de un periodo largo, del orden de días, semanas o meses.

Para mostrar el resultado obtenido se muestran dos gráficos (Figuras 7 y 8) obtenidos a partir de datos filtrados del sensor 3 de la sección 1 en dos estados, con poco oleaje y con mucho oleaje. Estos gráficos muestran las estadísticas (valores máximo, mínimo y medio) para muestras de 90 segundos (aproximadamente 12 olas) a lo largo de un periodo de dos días. En negro se muestra la media, en rojo el valor máximo, y en azul el valor mínimo.

En estos gráficos además se pueden ver apreciar otros aspectos de las características del oleaje registrado, como son:

- Que la distancia entre la banda roja y la banda azul representa la magnitud de la presión ejercida por el oleaje entre el paso de una cresta y el paso de un seno.
- Que cuando el oleaje es mas intenso, al paso de los senos de la ola el sensor se queda en seco, apareciendo el registro de los mínimos (el registro en azul) plano. Téngase en cuenta que el sensor 3 esta situado a la cota -0.5 , con lo que oleajes mayores de, aproximadamente dependiendo del nivel de marea, 1 metro de altura de ola, dejan al sensor en seco.

Para localizar con detalle el momento de mayor oleaje se amplia la gráfica de estadísticas alrededor del máximo, en el caso mostrado la gráfica de detalle muestra que el máximo valor de voltaje (correspondiente al oleaje mas fuerte) se produce a las 10:21 del día 26 de Junio de 2007. Es para este momento para cuando se obtienen, simultáneamente, los algo mas de 30 segundos en los que aparece el grupo de olas y la ola identificada como pésima, para el cajón, en el periodo analizado. En el caso mostrado, este período considerado como pésimo es el comprendido entre las 10:21:40 y las 10:22:11 del día 26 de Junio de 2007. La Figura 10 muestra los registros simultáneos obtenidos por los sensores del paramento principal al paso de este grupo de olas.

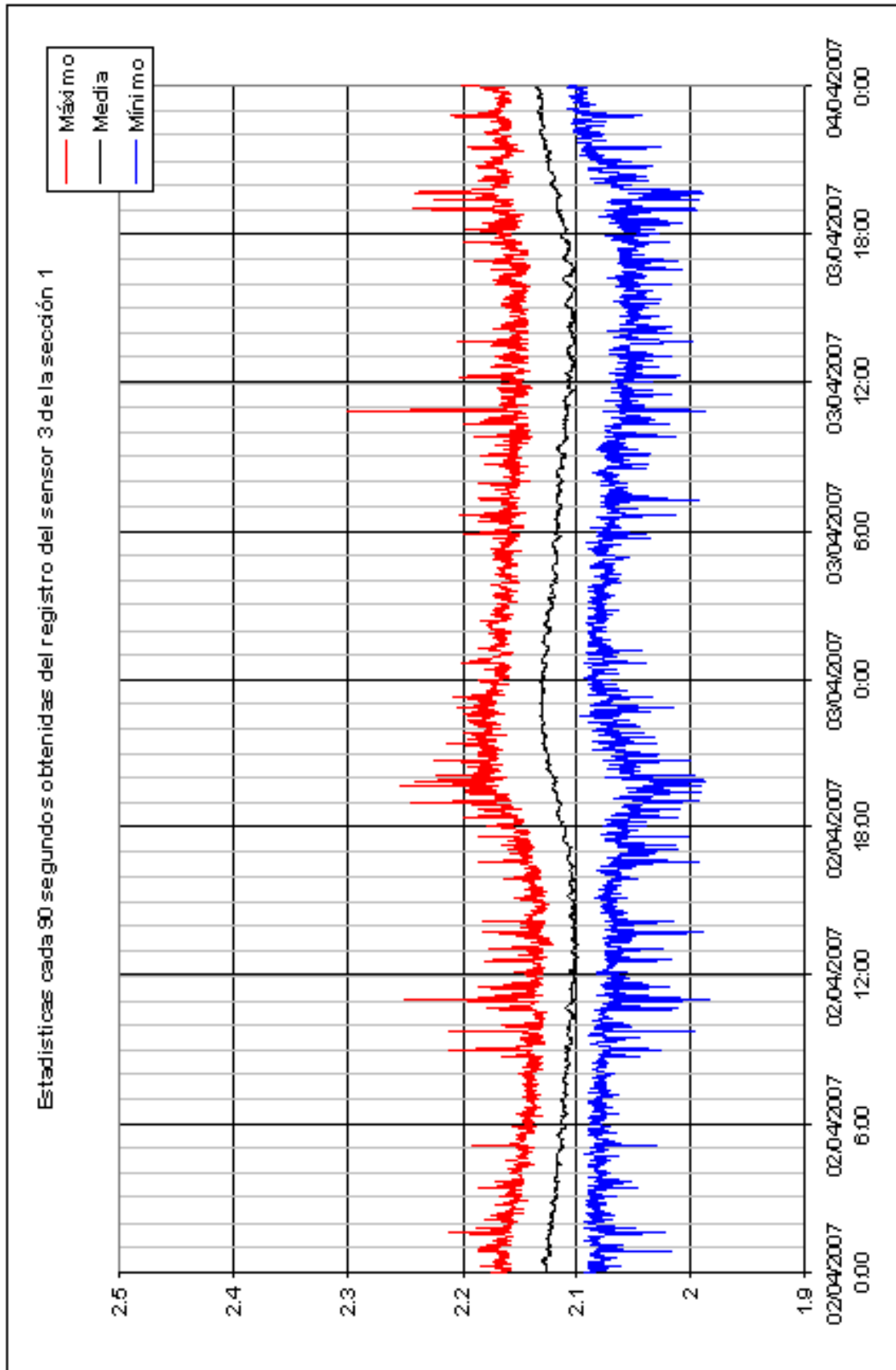


Figura 7. Estadísticas obtenidas con poco oleaje.

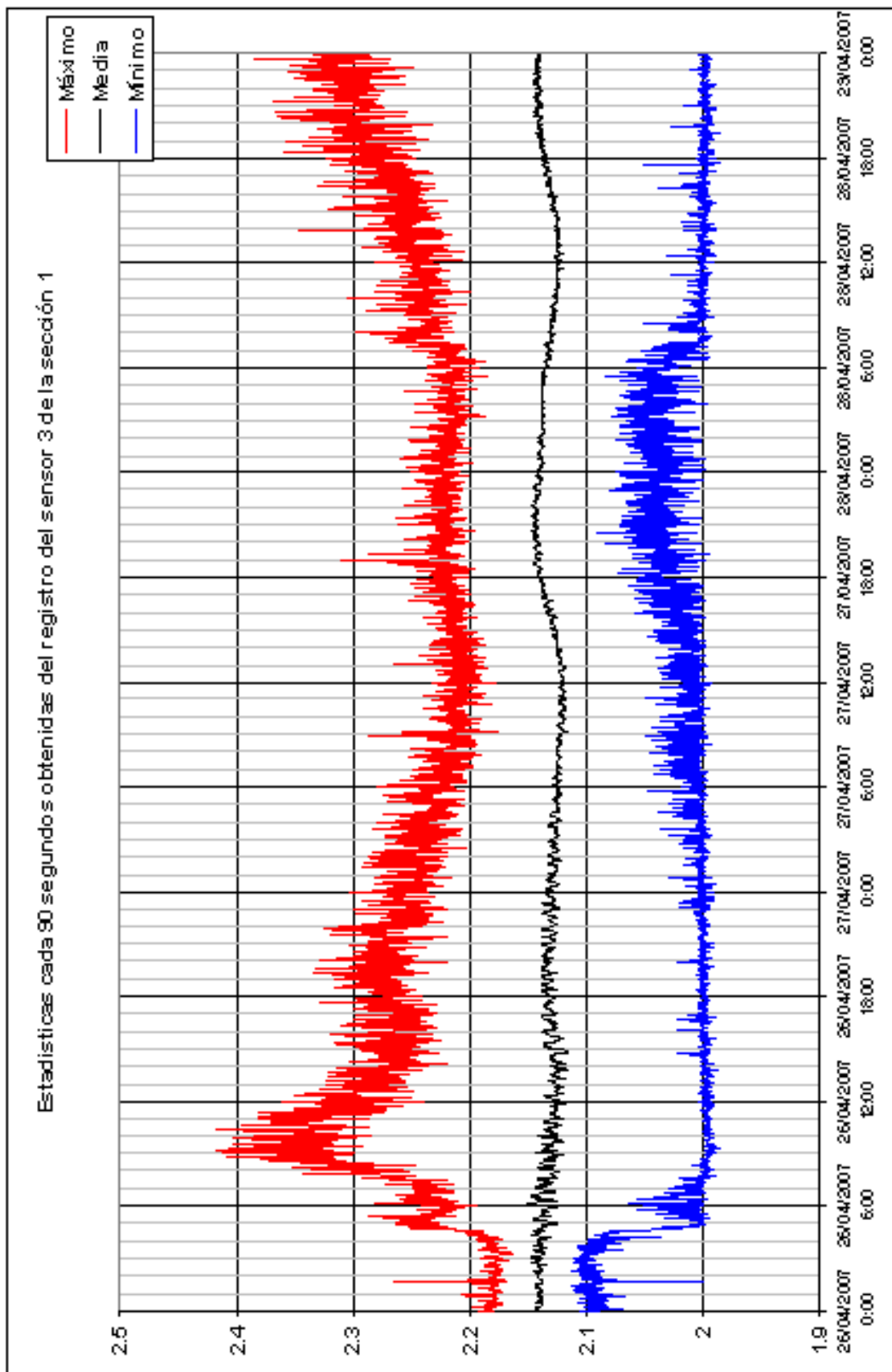


Figura 8. Estadísticas obtenidas con poco oleaje.

Grupo de olas que ofrece la máxima presión simultanea (bares).

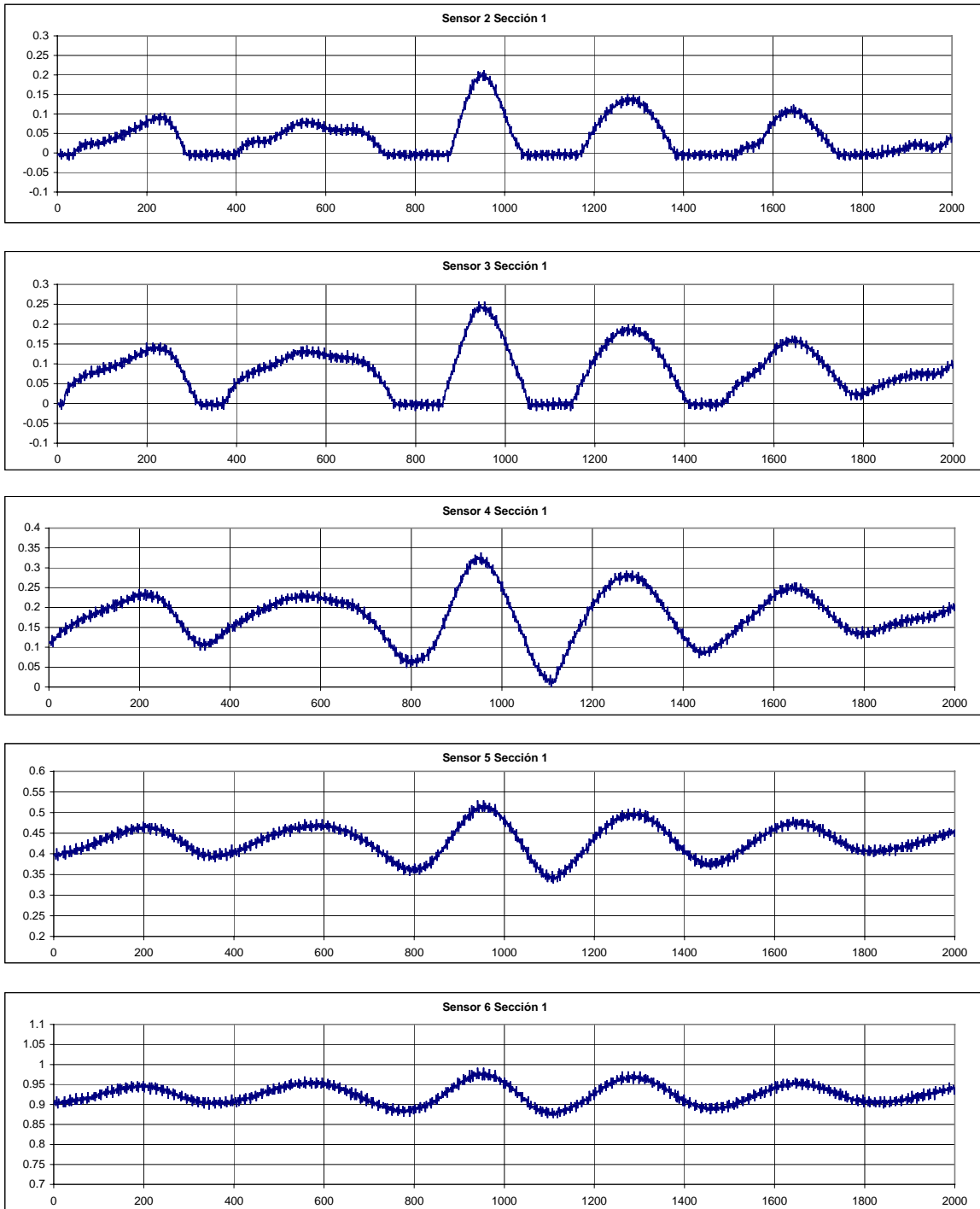


Figura 10. Registros simultáneos de presiones registradas.

Esta aplicación desarrollada permite también calcular estadísticas de las ondas individuales a su paso por un nivel medio. De esta forma se calculan una serie de secuencias de parejas de datos (Amplitud, Periodo) que permiten su representación gráfica.

A continuación, la Figura 11 presenta dos graficas de los pares (Amplitud, Periodo) en situación de mar en calma y en situación de temporal. Las estadísticas se han calculado para un periodo de 3 horas (algo mas de 700000 valores) del registro del sensor 4 de la sección 2 en el mes de Marzo de 2007.

La Figuras 12 y 13 presentan el análisis realizado sobre las casi 32000 ondas individuales (desde un paso por cero hasta el siguiente) registradas por el sensor 4 de la sección 2 durante el estado de máximo oleaje analizado entre las 0:00 horas del 30 de agosto de 2007 y las 0:00 horas del día 1 de septiembre de 2007. En la Figura 12 se muestran, de forma secuencial según se han ido registrando por el sensor 4, las amplitudes de cada onda, y en la Figura 13 se muestran de forma secuencial los periodos de cada onda.

Estas amplitudes y periodos son análogos a los registros instrumentales tomados para este periodo por la boya de medida de oleaje fondeada en Capdepera, y en ellos se ve claramente como las amplitudes aumentan al iniciarse un estado de mayor agitación, de la misma forma que se ve como las frecuencias del oleaje se agrupan alrededor de un valor mas constante (debido a que el temporal esta causado por un oleaje mas maduro y desarrollado que el oleaje de viento presente al inicio del registro, correspondiente a un mar naciente o “en nido de abeja”).

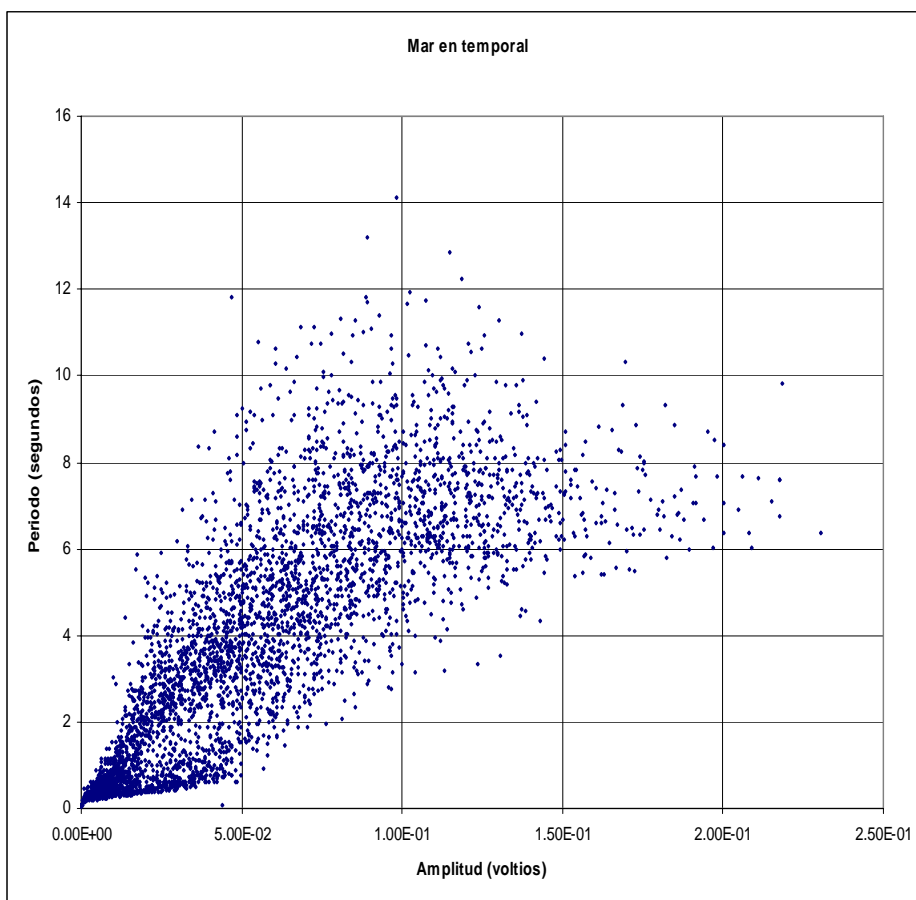
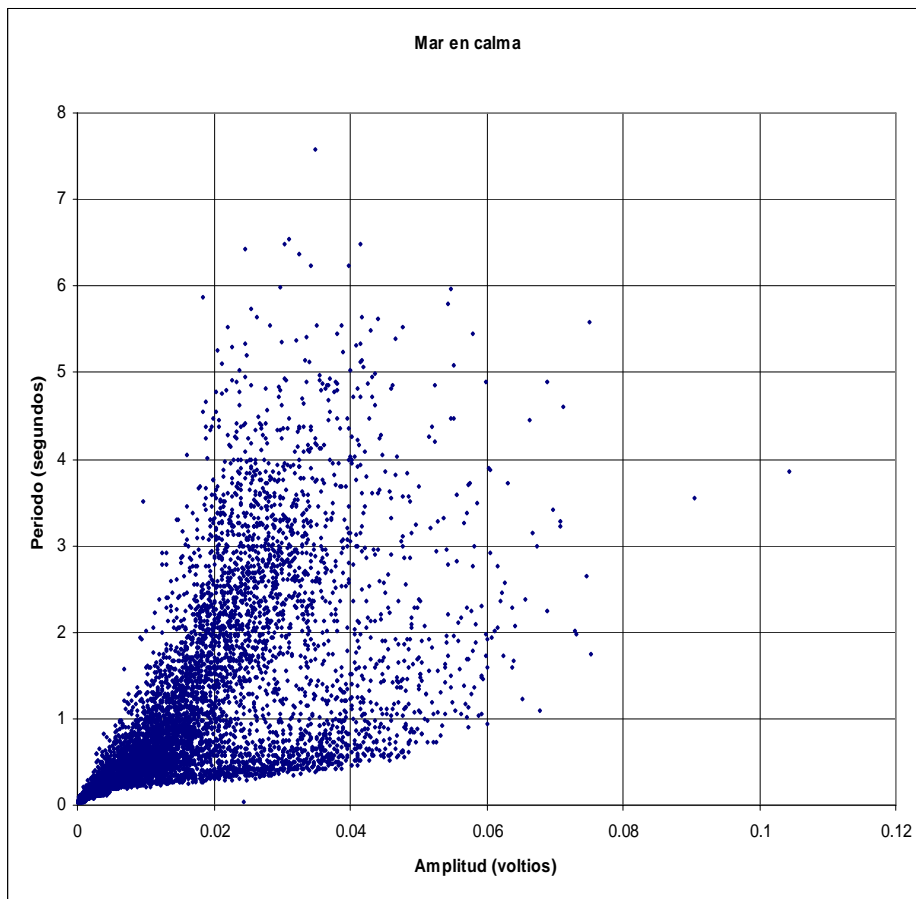


Figura 11. Pares amplitud-periodo obtenidos de la secuencia de olas en situación de mar en calma y mar en temporal.

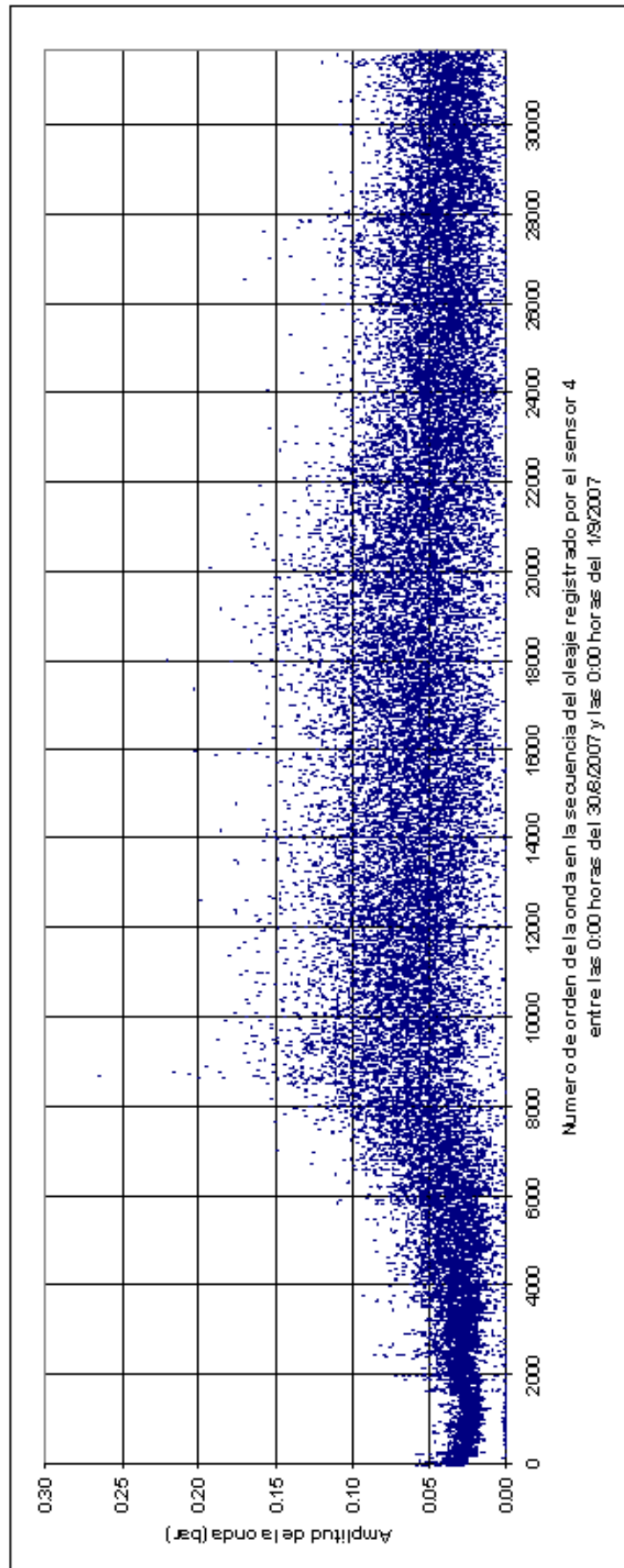


Figura 12. Secuencia de amplitudes de cada onda individual identificada.

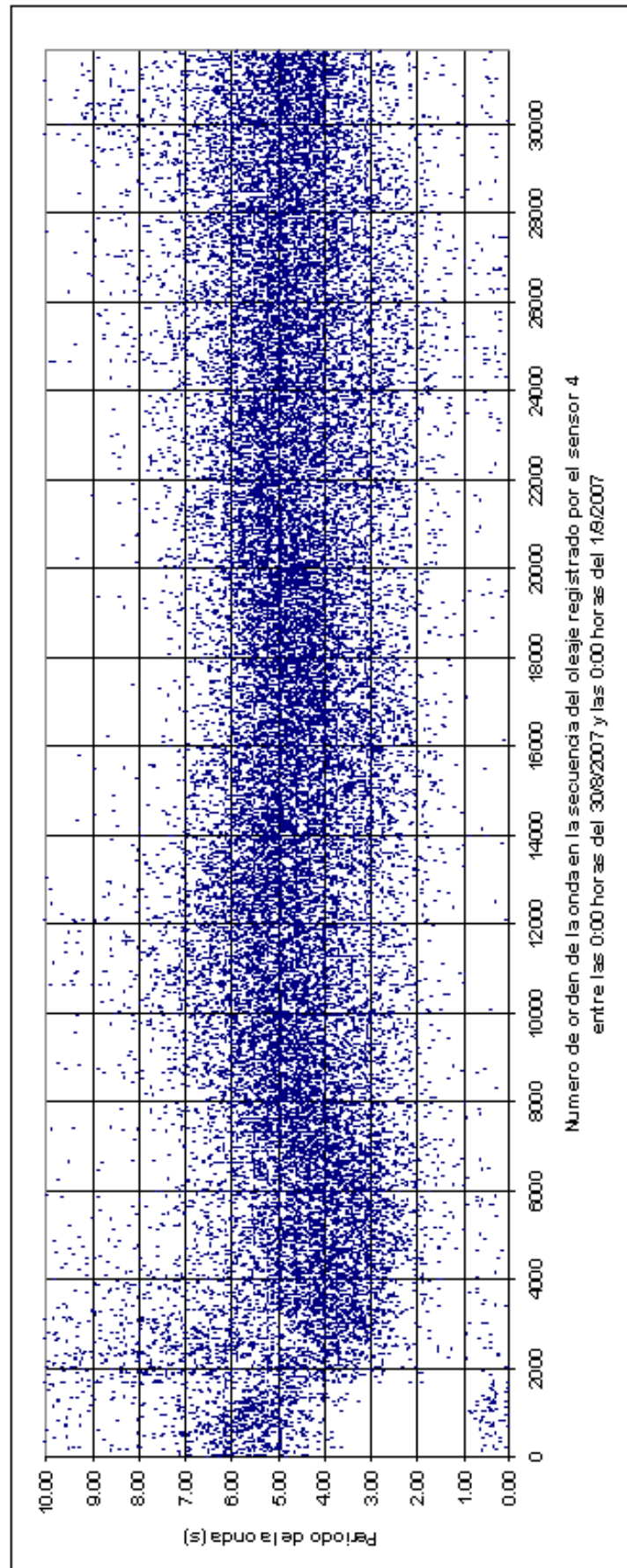


Figura 13. Secuencia de periodos de cada onda individual identificada.

Estos gráficos permiten observar el tipo y dispersión de las ondas que inciden sobre el dique, permitiendo además el estudio de los efectos de los grupos de ondas, lo que resulta totalmente novedoso en la de la estabilidad de las obras de comportamiento “rígido” ante el fallo.

A continuación, en la Figura 14 se muestra parte de la secuencia de amplitudes detectadas en el caso de mar en calma. Obsérvese como existen grupos de ondas que van aumentando de amplitud para luego volver a la tendencia general.

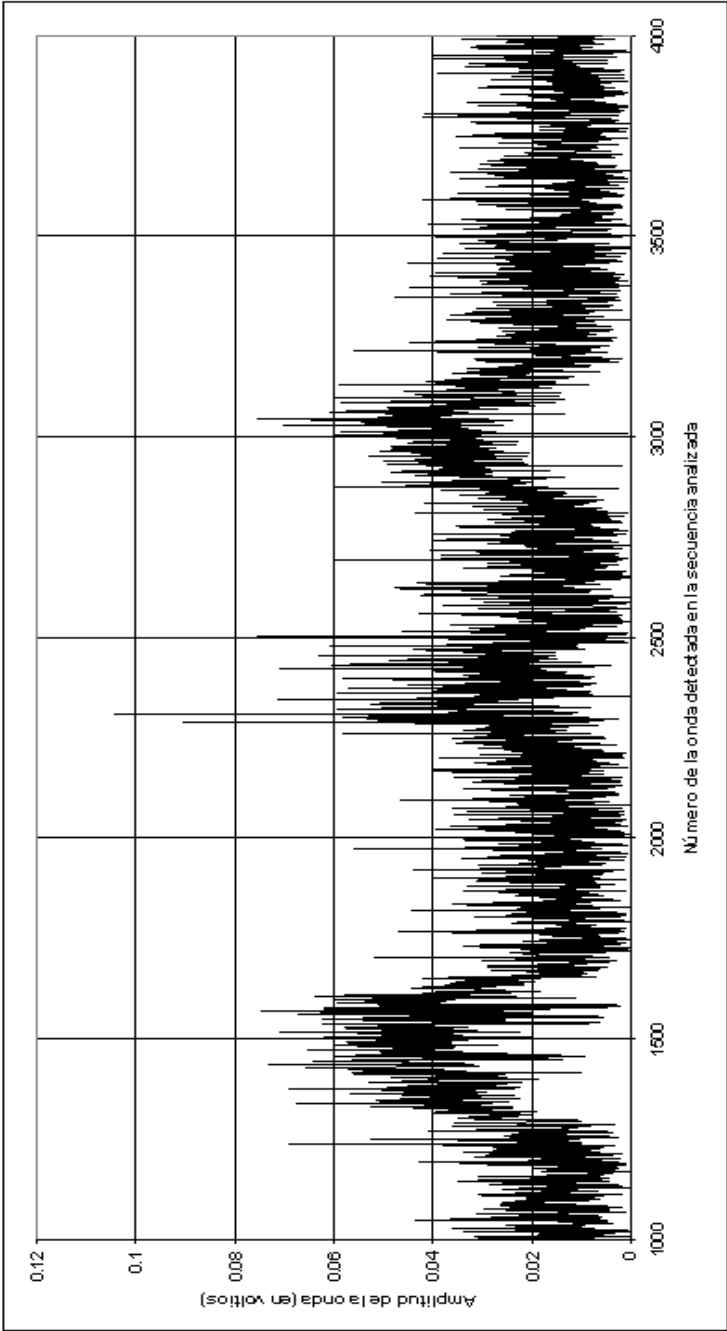


Figura 14. Secuencia de amplitudes detectadas en el caso de mar en calma.

3. ESTUDIO DE LAS CONDICIONES DE LA MAREA.

A partir de las aplicaciones informáticas desarrolladas es posible además estudiar la marea presente en el lugar de la medida, en este caso en Ibiza.

Comparando el gráfico de estadísticas de nivel medio de un sensor con la marea registrada en el Puerto de Ibiza (gracias al mareógrafo instalado por Puertos del Estado) se observa la perfecta coincidencia entre ambas.

A continuación se muestran dos gráficos comparando, a lo largo de algo menos de dos semanas, la marea registrada por el mareógrafo instalado por Puertos del Estado en Ibiza (Figura 15) y el obtenido a partir de las estadísticas del sensor 7 de la sección 1 del Dique de Botafoc, en Ibiza (Figura 16).

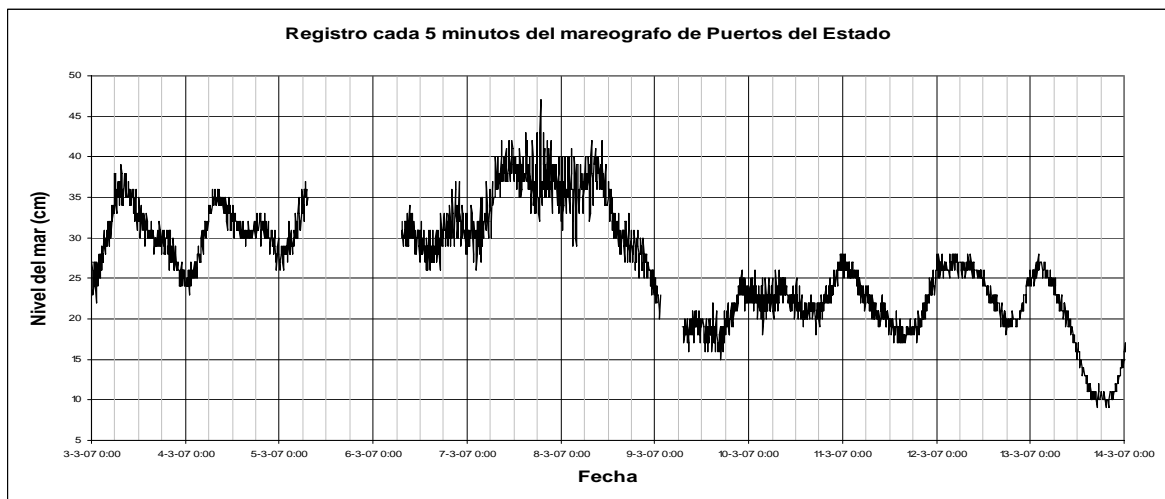


Figura 15. Registro obtenido por el mareógrafo de Ibiza.

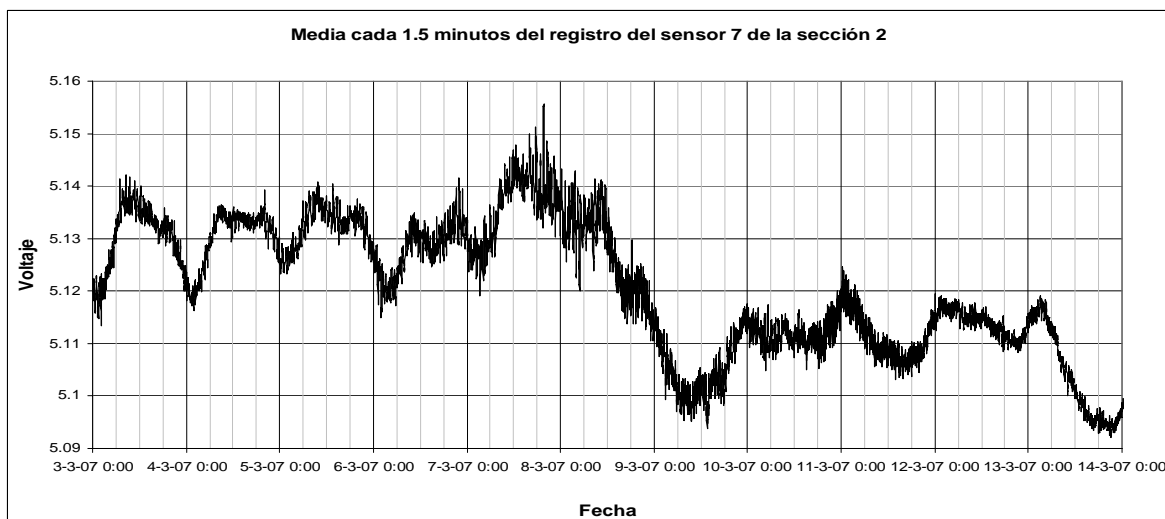


Figura 16. Media obtenida a partir del registro del sensor 7.

Se observa como el sensor analizado, en este caso el numero 7 de la sección 1, puede, perfectamente ser utilizado como mareógrafo.

4. FILTRADO DE LA ENERGIA DEL OLAJE CON LA PROFUNDIDAD.

En los gráficos de densidad espectral obtenidos para cada sensor tras realizar la FFT, se puede apreciar como los picos de energía van descendiendo en frecuencia a la vez que aumenta la profundidad del sensor que la registra. Es decir, se observa como los sensores cercanos a la superficie se ven mas afectados por los oleajes de corto periodo (en torno a los 3 segundos), mientras que los profundos registran picos de energía correspondientes a oleajes de mas largo periodo (en torno a los 5 o 6 segundos).

En las Figuras 17, 18, 19, 20 y 21 se muestran los espectros frecuenciales durante un día del mes de Agosto de 2007 en el que se daba un oleaje tipo Sea de periodos cortos y gran dispersión de las frecuencias presentes en este estado de mar.

Este filtrado de la energía del oleaje con la profundidad, ampliamente descrito teóricamente, se ve ahora efectivamente registrado en la naturaleza gracias a la instrumentación instalada y mantenida operativa en el cajón nº 8 del Dique de Botafoc.

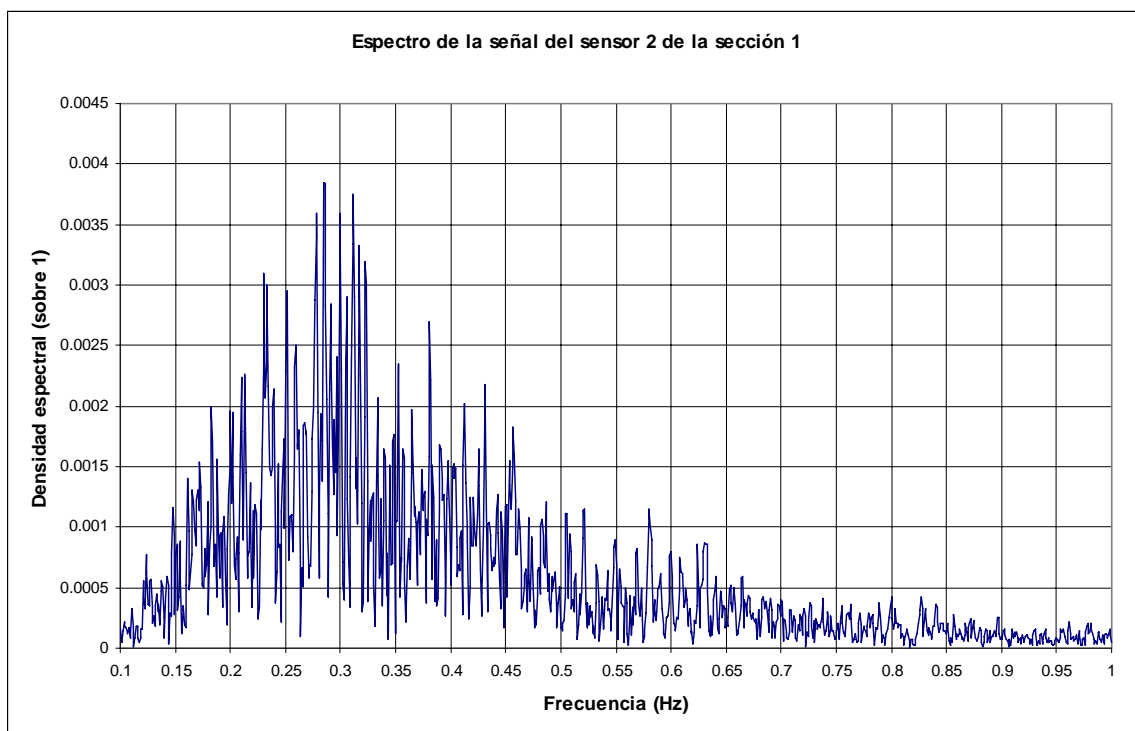


Figura 17.

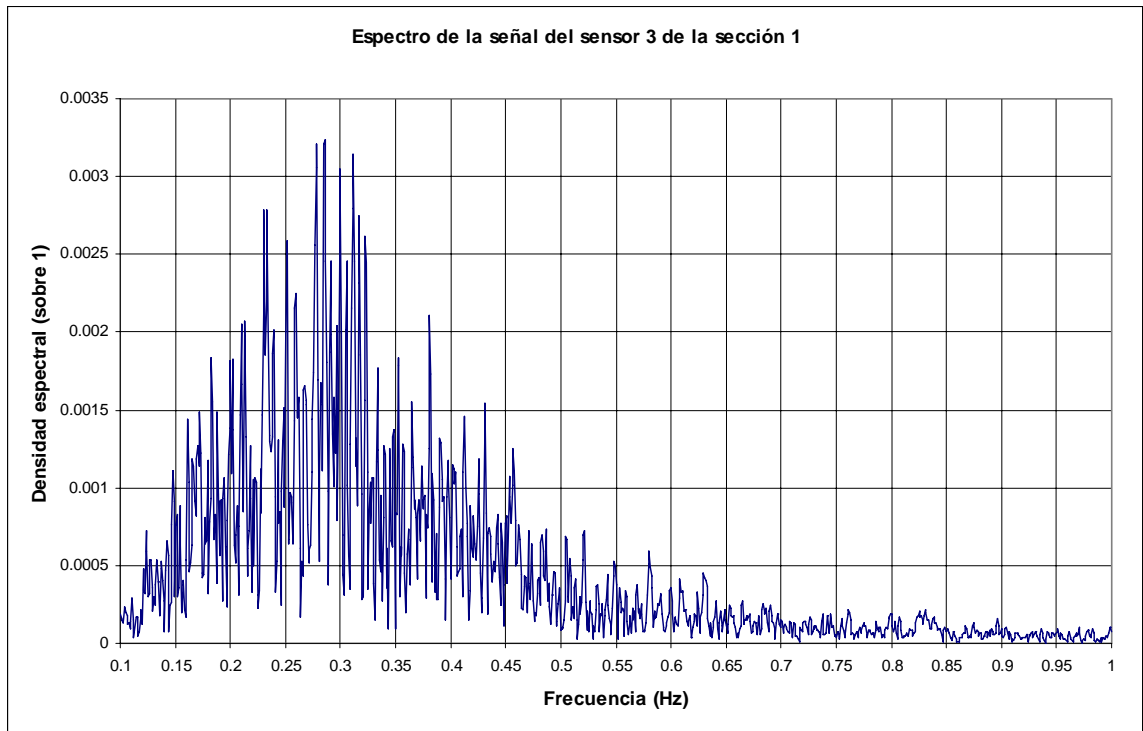


Figura 18.

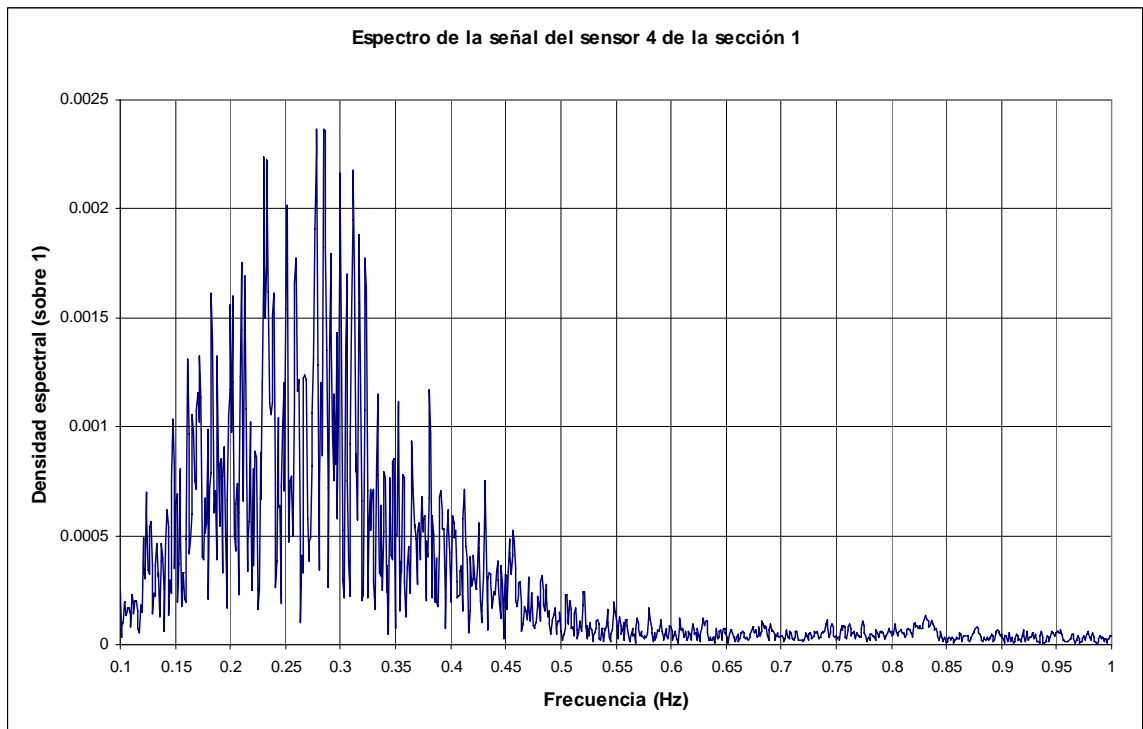


Figura 19.

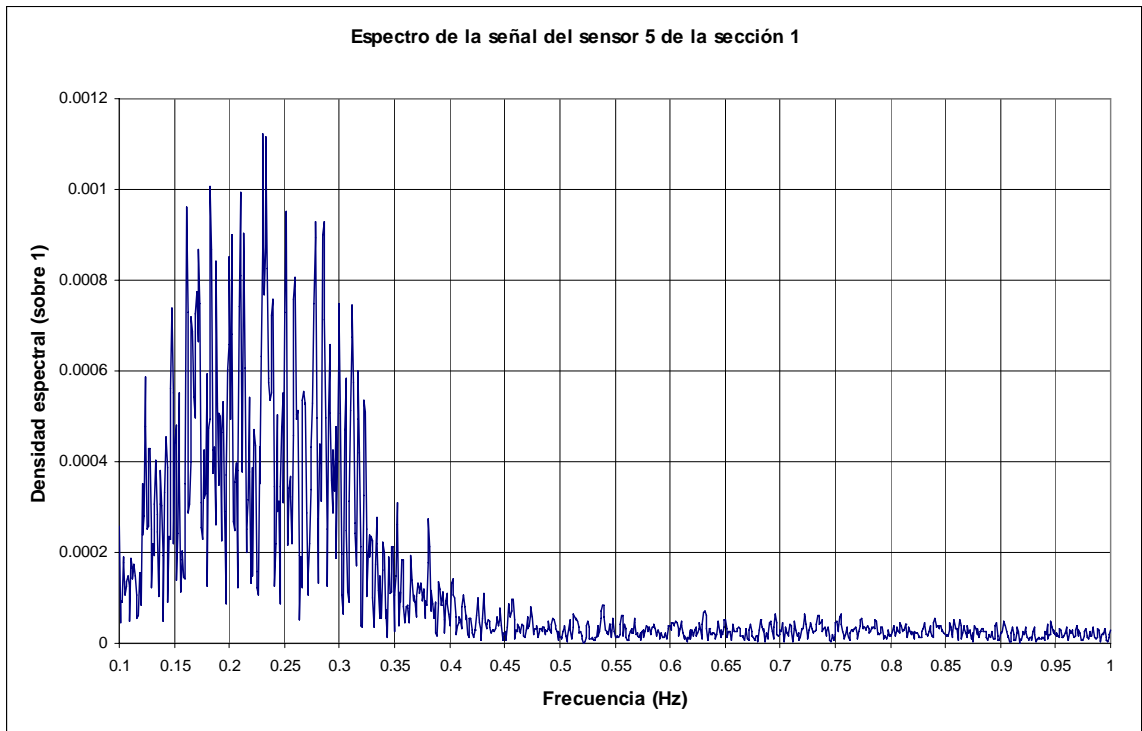


Figura 20.

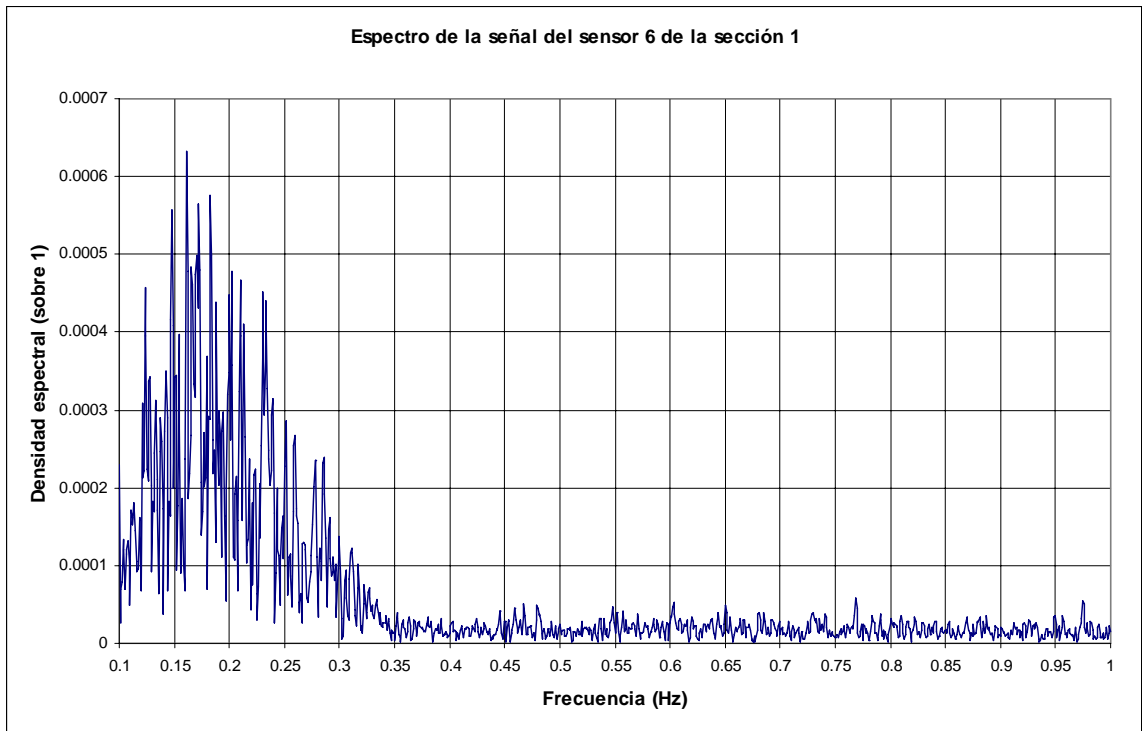


Figura 21.

5. CONCLUSIÓN.

Gracias a los datos que se están obteniendo en la instrumentación del Dique de Botafoc, se han abierto nuevas líneas de investigación en la que ya se está trabajando y de las que se esperan obtener numerosas conclusiones válidas acerca del comportamiento de los diques verticales frente a las acciones del oleaje, y que permitirán avanzar el estado del arte, constando o desmintiendo algunas de las teorías clásicas más empleadas.

No obstante, los datos que el sistema de medida de Botafoc proporciona son totalmente novedosos y deben someterse a todas las críticas iniciales que un conjunto de datos de estas características exige para su validación.

6. AGRADECIMIENTOS.

Este trabajo se está desarrollando en estrecha colaboración con la Autoridad Portuaria de Baleares, por lo que queremos dejar constancia de nuestro expreso reconocimiento por su apoyo y sus valiosas aportaciones, además de a D. Ángel Matías, coautor de este artículo, a D. Joaquín Jiménez, D. David Pino y D. Armando Parada.

Además, agradecemos la gran ayuda prestada a todas las personas que de forma directa o indirecta han intervenido y están actualmente trabajando en el mantenimiento y la explotación de datos de la instrumentación del cajón número ocho del Dique de Botafoc en el Puerto de Ibiza, pertenecientes a la Universidad, a la Autoridad Portuaria de Baleares y al Ente Público Puertos del Estado.

7. BIBLIOGRAFÍA.

1. ALLSHOP, W ; KORTENHAUS, A. (2001). Probabilistic Design Tools for Vertical Breakwaters, February 2001, pp 61-151
2. ALMAZÁN GÁRATE, J.L et al. (2001). Oscilaciones en masas de agua confinadas: resonancia en puertos. E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
3. ALMAZÁN GÁRATE, J.L et al. (2000). Descripción, medida y análisis del oleaje. E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
4. ALMAZÁN GÁRATE, J.L et al. (1999). Estática de Fluidos. E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
5. AMORÓS, J.R; LLORCA, J; ELVIRA, A.R; LOPEZ, J.D; LARRAZ, M.A. (1997). Instrumentación en prototipo de un dique de cajones. Caso del Dique de Reina Sofía del Puerto de Las Palmas. IV Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos, Mayo de 1997. Universidad de Cádiz.
6. BLACKMORE, P.A.; HEWSON, P. (1984). Experiments on full scale impacts pressures. Coastal Engineering, Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Science Publishers B.V. , vol 8, pp 331-346
7. FRANCO, L. (1994). Vertical breakwaters: the Italian experience. Coastal Engineering, vol 22: pp 31-55
8. GODA, Y. (1985): Random seas and design of maritime structures. Tokyo: University of Tokyo Press.
9. KIYOSHI, H. (1988): Nearshore Dynamics and Coastal Processes; Theory, Measurement, and Predictive Models. University of Tokyo Press.

10. Probabilistic Design Tools for Vertical Breakwaters. VOLUME IIa HYDRAULIC ASPECTS.
11. KORTENHAUS, A.; OUMERACI, H. (1998): Clasification of wave loading on monolithic coastal structures. Proceedings International Conference Coastal Engineering (ICCE), ASCE, no.26, Volume 1, pp. 867-880
12. LUNDGREN, H.; JORGEN J. (1995). Optimisation of caisson breakwater design. Wave forces on inclined and vertical wall structures, ASCE pp 181-204
13. MCCONNELL, K. J. (1999): Derivation, validation and use of parameter map. MAST III, PROVERBS:
14. OUMERACI, H.; KORTENHAUS, A.; ALLSOP, W.; DE GROOT, M.; CROUCH, R.; VRIJLING, H.; VOORTMAN, H. (2001): Probabilistic Design Tools for Vertical Breakwaters, Balkema Publishers
15. Coastal Engineering, vol 22: pp 3-29
16. OUMERACI, H. 1998. Wave impact loading and dinamyc response of vertically faced breakwaters. European Reserch Project Mast III/Proverbs.
17. TAKAHASHI, S. (1999): Breakwater Design. Gregory P. Tsinker. Chapman and Hall. International Thomson Publishing.
18. TANIMOTO, K.; MOTO, K.; ISHIZUKA, S. and GODA, Y. (1976): An investigation on design wave force formulae of composite-type breakwaters. Proc. 23rd Japanese Conf. Coastal Engineering, pp. 11-16.