

Distribución conjunta altura-periodo de ola en el litoral español

MANUEL SOTILLO MEMBIBRE (*)

RESUMEN La distribución conjunta de altura-periodo del oleaje es importante para el estudio de fenómenos dinámicos en la ingeniería de puertos y costas. En este artículo, partiendo de medidas en la naturaleza hemos descrito la distribución conjunta en varias áreas del litoral español.

JOINT DISTRIBUTION HEIGHT-PERIOD ON THE SPANISH COAST

ABSTRACT *The joint distribution height-period of sea wave is very important to study coastal dynamics and Harbour engineering. In this paper, with observed wave heights and periods we have described the joint distribution on the Spanish coast.*

Palabras clave: Distribución conjunta, Altura de ola, Periodo de ola, Costas, Puertos.

Keywords: Joint distribution, Wave height, Wave period, Coastal and Harbour.

1. INTRODUCCIÓN

Las olas se generan por la fricción del viento con la superficie del mar, formándose pequeñas ondulaciones, que van aumentando con la velocidad del viento y la persistencia. Si observamos la ola en el área de generación, que es donde el viento sopla, su disposición y movimiento es caótico. Se observan olas de diferentes amplitudes y periodos que se mueven en diferentes direcciones; esto se conoce como mar de viento o en inglés Sea.

Cuando las olas salen del área de actuación del viento, se van ordenando progresivamente, con ondas bien definidas y con un cierto ritmo, propagándose a miles de kilómetros, hasta llegar a profundidades finitas donde su energía se disipan, internamente, por interacción con el fondo, o por turbulencia al romperse.

Aunque la descripción matemática del oleaje es compleja por las irregularidades y aleatoriedad, se han desarrollado varias teorías para explicarlos. La más clásica fue desarrollada por Airy en 1845 denominada lineal. Se ajusta bien en profundidades indefinidas y admite la superposición.

Gerstner en 1802, desarrolló la teoría trocoidal, fue la primera teoría para ondas de amplitud: Aunque el movimiento de las partículas de agua no se corresponde con la realidad.

En 1880 Stokes, desarrolló una teoría para ondas de amplitud finita con posteriores aproximaciones de orden superior.

Una teoría válida para profundidades intermedias y pequeñas es la teoría Cnoidal. Cuando una ola entra en la zona de pequeña profundidad se aproxima a una onda solitaria; su cresta se va acortando y elevando mientras su seno tiende ha-

cerse más largo y plano. La rotura de la onda solitaria ante la progresiva disminución de la profundidad se produce cuando la relación (H/d) H altura de ola y d profundidad) alcanza según Mc. Cowan el valor de 0,78. Sin embargo, de forma experimental se ha comprobado que depende de otros factores como la pendiente, rugosidad del fondo y longitud de onda.

La naturaleza aleatoria del movimiento de la superficie del mar nos obliga a emplear métodos estadístico, para formular modelos que permitan analizar y hacer previsiones de la dinámica de la superficie del mar.

Si conociésemos con exactitud los mecanismos de generación, propagación y disipación del oleaje, podríamos modelar con las ecuaciones diferenciales que rigen el movimiento de los fluidos. Pero las fluctuaciones de la superficie del mar son el resultado de muchos tipos de interacciones y de fenómenos de distintas clases, por lo que adopta la estructura característica de un proceso estocástico.

Los métodos estadísticos nos permitirán caracterizar el oleaje, mediante parámetros cuyo comportamiento puede modelarse y predecirse. Las diferentes técnicas estadísticas pueden englobarse en análisis en el dominio del tiempo, de la frecuencia y de la probabilidad.

La superficie del mar, cuando interacciona con el viento, presenta una estructura tan compleja, que a pesar de estar controlada por las leyes de la Mecánica de Fluidos, resultaría imposible obtener una descripción analítica o predecir su comportamiento dinámico. Esta dificultad nos fuerza a emplear métodos estadísticos, para poder desarrollar modelos matemáticos que nos permitan analizar y prever la dinámica de la superficie del mar.

Al estudiar el comportamiento de un fenómeno geofísico en función del tiempo, generalmente, su evolución no puede ser predicha con exactitud, aunque nuestras observaciones se prolongasen indefinidamente. En estos casos diremos que el fenó-

(*) Ldo. C. Físicas, Ingeniero T. Construcciones Civiles. Técnico Superior, Jefe de Sección Técnica. Centro de Estudios de Puertos y Costas. CEDEX. c/ Antonio López 81. 28026 Madrid. email: manuel.sotillo@cedex.es



FOTO 1. Bahía de Santa Pola (M. Sotillo).

meno analizado es un proceso estocástico. En otras palabras, que su evolución tiene lugar de forma aleatoria, de modo que cada observación del proceso proporciona un registro único e irrepetible, como es el caso del oleaje.

Se define un proceso estocástico como una familia de variables aleatoria indicadas por algún parámetro que se asocia con el tiempo

Dentro del conjunto de los procesos estocásticos. Existen procesos físicos cuyas propiedades estadísticas no varían significativamente en función del tiempo, al menos en un intervalo temporal adecuado. Este subconjunto recibe el nombre de procesos estocásticos estacionarios.

Para que un p.e. sea estrictamente estacionario se debe verificar la invarianza temporal de todas las distribuciones de probabilidad y, por tanto, la de todos los momentos estadísticos. Esta imposición es demasiado restrictiva por ello, en general, y en el caso particular del oleaje, se puede utilizar el concepto de estacionariedad de orden m o estacionariedad en sentido amplio.

En la mayoría de los estudios de oleaje se admite que la superficie del mar puede ser considerada como un proceso estocástico estacionario de segundo orden. En otras palabras que los momentos estadísticos de primer y segundo orden son invariantes en el tiempo.

Una subclase muy interesante es la de cuya distribución de probabilidad conjunta viene dada por una distribución Normal, que se denominan procesos estocásticos estacionarios gaussianos.

Para que la teoría de los procesos estocásticos sea útil, será necesario emplear alguna hipótesis que permita estimar las características de un proceso físico, con naturaleza aleatoria, a partir de un único registro temporal. Como respuesta a dicho problema surge la hipótesis de ergodicidad.

Un proceso estocástico se considera ergódico si los promedios temporales estimados sobre cualquiera de sus posibles realizaciones, son estadísticamente iguales a los obtenidos sobre la colección para cualquier instante de tiempo.

Si todos los promedios estadísticos del conjunto pueden deducirse mediante promedios temporales, diremos que el proceso estocástico es estrictamente ergódico.

Por el contrario en las aplicaciones físicas de interés suele estar centrado en los procesos denominados débilmente ergódicos. Esto quiere decir que la condición de ergodicidad se verifica para el valor medio y para la función de autocorrelación. Como consecuencia que cada serie de oleaje es representativa del proceso.

2. DISTRIBUCIÓN CONJUNTA ALTURA PERÍODO

Durante los últimos 50 años se han propuesto diferentes formulaciones analíticas, que intentan describir el comportamiento estadístico conjunto de las alturas y los periodos. El primer intento fue de Longuet-Higgins (1957, 1975) tomando los resultados de Rice y Wooding basados en los estudios de ruido aleatorio de banda estrecha. No obstante este modelo no reproduce las asimetrías observadas experimentalmente.

Entre las contribuciones más revelantes para caracterizar el comportamiento estadístico de alturas y periodos son: Cavanie et al. (1976), Lindaren- Rychik (1982) y Longuet-Higgins (1983).

En este artículo la distribución de altura periodo la vamos a representar, partiendo de datos medidos en la naturaleza mediante tablas de encuentros altura – periodo; en cada casilla se escribe el número de ocurrencias, expresado en tanto por ciento sobre el total del número de observaciones o por gráficas. Estas distribuciones conjuntas nos caracterizan el oleaje medio en una zona y nos da información de cuáles son los periodos asociados con cada altura de ola.

Los datos han sido registrados por boyas del programa REMRO y campañas de oleaje para OPPE (M° de Fomento). La altura y los periodos son resultados del proceso estadístico espectral de series discretas de 5120 puntos, de elevaciones de la superficie del mar medidos en la mayoría de las estaciones durante más de 20 años.

Vamos a comparar la distribución a lo largo del litoral español, en las áreas que se han registrado datos en los últimos años.

– MEDITERRÁNEO:

- Palamós (Gerona)
- Barcelona
- Tarragona
- Valencia
- Alicante
- Cartagena
- Cabo Gata
- Málaga
- Algeciras
- Ceuta
- Melilla
- Capdepera (Mallorca)

– CANTÁBRICO:

- Bilbao
- Gijón II

– ATLÁNTICO:

- La Coruña
- Cabo Silleiro
- Las Palmas I
- Las Palmas II
- Tenerife

– ATLÁNTICO-GOLFO DE CÁDIZ:

- Sevilla
- Cádiz

2.1. MEDITERRÁNEO

La boya de Gerona está fondeada en Palamós en las siguientes coordenadas $41^{\circ} 49,80' N$, $3^{\circ} 11,27' E$ y la profundidad de la zona es 90 metros.

Los datos empleados para la matriz de distribución son los registrados desde febrero de 1986 hasta final de diciembre de 2008, el número de meses es 251.

Vamos a usar una notación matricial para definir cada elemento de la tabla. (Véase tabla 4).

$A_{1,1} = 1,16$, $A_{1,2} = 12,14$, $A_{1,3} = 14,47$, $A_{1,4} = 4,89$ etc.

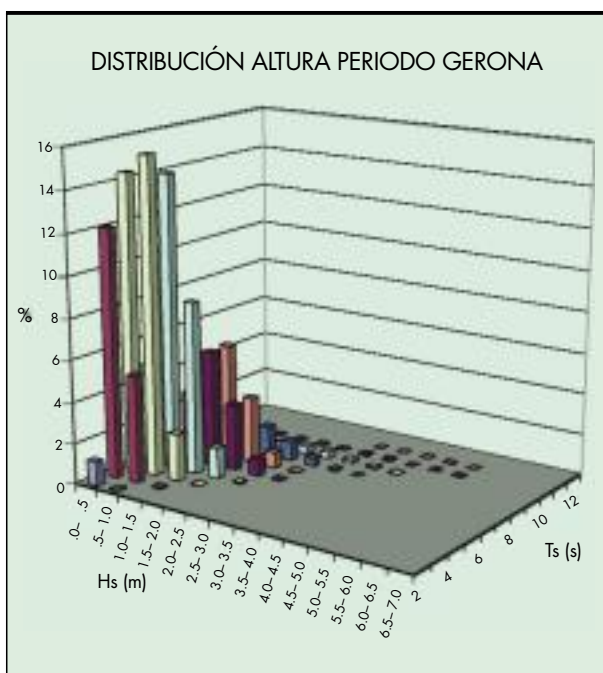


FIGURA 1. Distribución Conjunta Gerona.

El rango de altura 0-5,5 m. (en esta tabla no se contemplan datos que su porcentaje sea menor que 0,01) sólo se analiza el oleaje medio.

El rango de periodos es 2 a 11 s. El 90% de la altura de ola es menor o igual que 1,5 metros y el 92% de los periodos oscilan entre 3 y 7 segundos.

La boya de Barcelona está fondeada en las coordenadas 41°10,4' N y 2° 9,0' E en una zona de 28 m. de calado.

Los datos empleados para la matriz de distribución son los registrados desde enero de 2003 hasta final de diciembre de 2005, el número de meses es 26.

El rango de alturas es 0 a 4 m. y el de periodos de 2 a 12 s.

El 95% de las alturas son menores de 1,5 m. y el 91% de los periodos esta comprendido entre 3 y 7 s.

La boya de Tarragona está fondeada en las siguientes coordenadas : latitud 41° 3,87' N , longitud 1° 12,28' E y calado 35 metros.

Los datos empleados para confeccionar la tabla están comprendidos entre noviembre de 1992 y diciembre de 2008.

El rango de alturas es de 0 a 3,5 metros y el de periodo significativo de 2 a 12 s.

El 93,5% de las alturas son menores de un metro y el 93% de los periodos están comprendidos en el intervalo [3,7].

La boya de Valencia está fondeada en las siguientes coordenadas: latitud 39° 28,00' N, longitud 0° 17,0' W y calado 20 metros.

MATRIZ DE DOBLE ENTRADA: ALTURA - PERÍODO ZONA: BARCELONA																						
Fecha inicio = 2003- 1 Fecha Final =2005-12 N. de meses = 26 Variables: Hzs (m) – Tzs(s)																						
	periodos																					
alturas	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	22-23	Total
0- 0.5	0.49	8.19	20.40	9.80	1.59	0.11	0.04															40.61
0.5- 1.0		2.36	12.96	14.99	9.29	2.12	0.24															41.96
1.0- 1.5			1.02	3.79	4.24	2.50	0.45	0.04														12.04
1.5- 2.0			0.04	0.61	1.22	0.95	0.46	0.18	0.02													3.48
2.0- 2.5				0.04	0.26	0.17	0.26	0.15	0.03	0.01												0.91
2.5- 3.0					0.05	0.24	0.27	0.21	0.02													0.80
3.0- 3.5						0.02	0.09	0.04	0.01													0.16
3.5- 4.0							0.02	0.04														0.05
4.0- 4.5																						
4.5- 5.0																						
5.0- 5.5																						
5.5- 6.0																						
6.0- 6.5																						
6.5- 7.0																						
7.0- 7.5																						
7.5- 8.0																						
8.0- 8.5																						
8.5- 9.0																						
9.0- 9.5																						
9.5- 10.0																						
10.0- 10.5																						
10.5- 11.0																						
11.0- 11.5																						
11.5- 12.0																						
Total	0.49	10.55	34.41	29.22	16.65	6.13	1.81	0.66	0.07	0.01												100.-

TABLA 1. Matriz Altura- Periodo Barcelona.

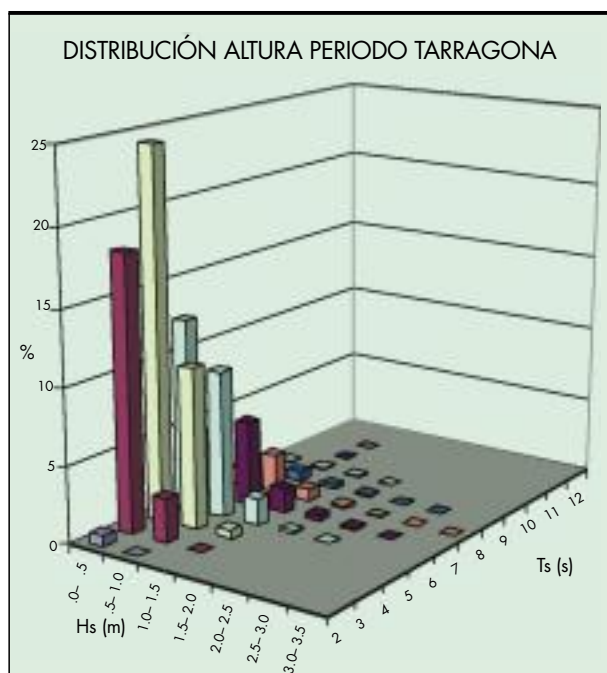


FIGURA 2. Distribución Conjunta Tarragona.

Los datos empleados son del periodo comprendido entre enero de 1986 y diciembre de 2005 en total 238 meses.

El rango de alturas es de 0 a 4.0 m. y el de periodos de 2 a 13 s.

El 90,5% de las alturas son menores de un metro y el 93,24% de los periodos están en el intervalo [3,7].

La boya de Alicante está fondeada en las siguientes coordenadas: latitud 38° 9,73' N, longitud 0° 5,0' W y calado 50 m.

El periodo de medida empleado es desde enero de 1986 a diciembre de 2007, el número de meses 256.

El rango de alturas de 0 a 4,5 m. y el de periodos de 2 a 12 s.

El 86,6% de las alturas son menores de un metro y el 91,7% de los periodos están en el intervalo [3,7].

La boya de Cartagena (Cabo de Palos) está fondeada en las siguientes coordenadas: latitud 37° 39,25' N, longitud 0° 38,30' W y calado 67 m.

El periodo de medida esta comprendidos entre enero de 1986 a diciembre de 2008, 276 meses.

El rango de alturas es de 0 a 5,5 m. y el de periodos de 2 a 12.

El 74% de las alturas son menores de un metro y el 91,2% de los periodos está comprendido en el intervalo [3,7].

La boya de Capdepera (P. de Mallorca) está fondeada en las coordenadas: latitud 39° 39,7' N y longitud 3° 29,12 E y un calado de 45 m.

El periodo de medida de mayo de 1989 a diciembre de 2008 un total de 235 meses.

MATRIZ DE DOBLE ENTRADA: ALTURA - PERODO ZONA: VALENCIA																						
Fecha inicio = 1986-1 Fecha Final =2005-12 N. de meses = 238 Variables: Hzs (m) – Tzs(s)																						
	periodos																					
alturas	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	22-23	Total
.0- .5	4.66	18.43	19.31	10.55	4.38	1.08	0.29	0.07	0.01													58.83
.5- 1.0	0.35	6.60	11.25	7.05	3.71	1.92	0.60	0.12	0.02													31.64
1.0- 1.5		0.14	1.58	1.97	1.31	0.82	0.43	0.17	0.01													6.43
1.5- 2.0			0.08	0.61	0.79	0.31	0.18	0.09	0.03													2.10
2.0- 2.5				0.07	0.32	0.19	0.04	0.02	0.02													0.67
2.5- 3.0					0.08	0.09	0.03	0.01	0.01													0.23
3.0- 3.5						0.05	0.03		0.01													0.09
3.5- 4.0											0.01											0.02
4.0- 4.5																						
4.5- 5.0																						
5.0- 5.5																						
5.5- 6.0																						
6.0- 6.5																						
6.5- 7.0																						
7.0- 7.5																						
7.5- 8.0																						
8.0- 8.5																						
8.5- 9.0																						
9.0- 9.5																						
9.5- 10.0																						
10.0- 10.5																						
10.5- 11.0																						
11.0- 11.5																						
11.5- 12.0																						
Total	5.01	25.17	32.22	20.25	10.59	4.45	1.60	0.49	0.11	0.02	0.01											100.-

TABLA 2. Matriz Altura- Periodo Valencia.

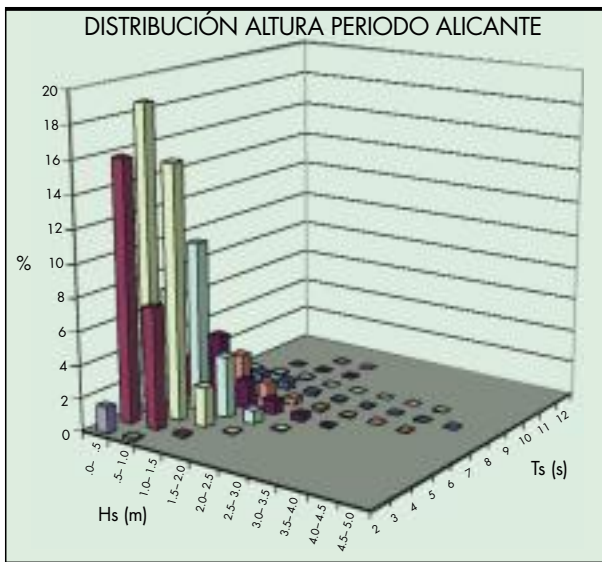


FIGURA 3. Distribución Conjunta Alicante.

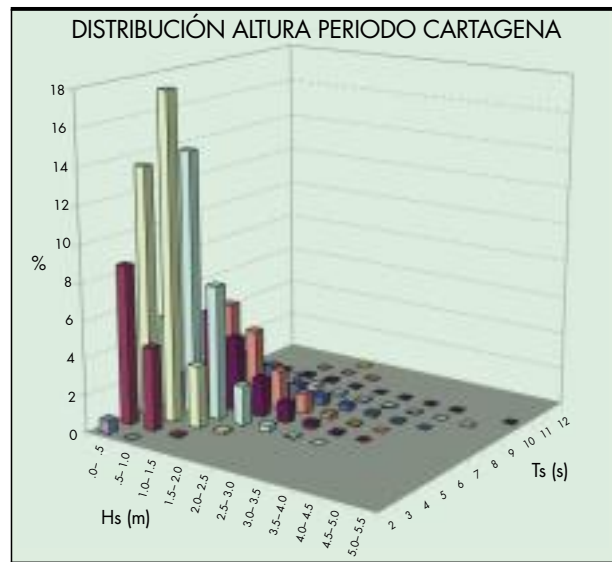


FIGURA 6. Distribución Conjunta Cartagena.

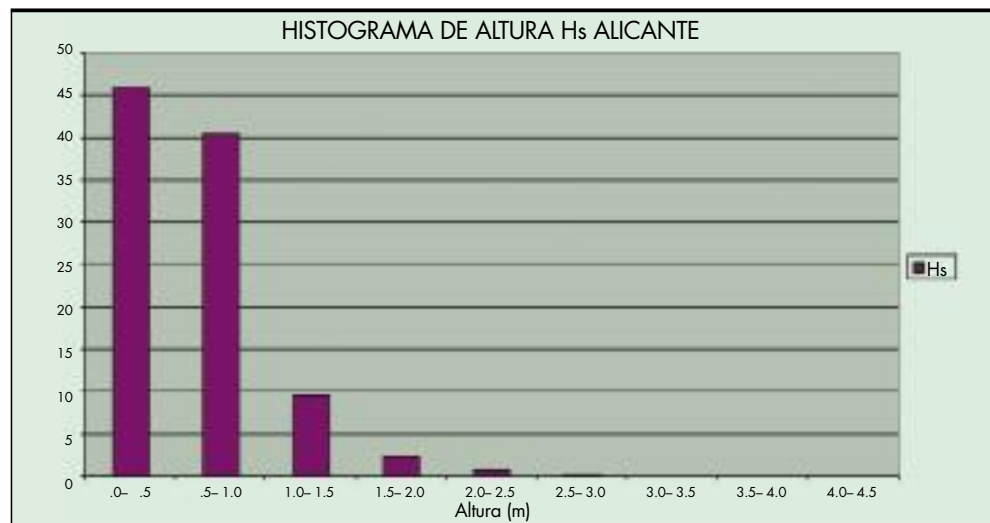


FIGURA 4. Histograma de Alturas Alicante.

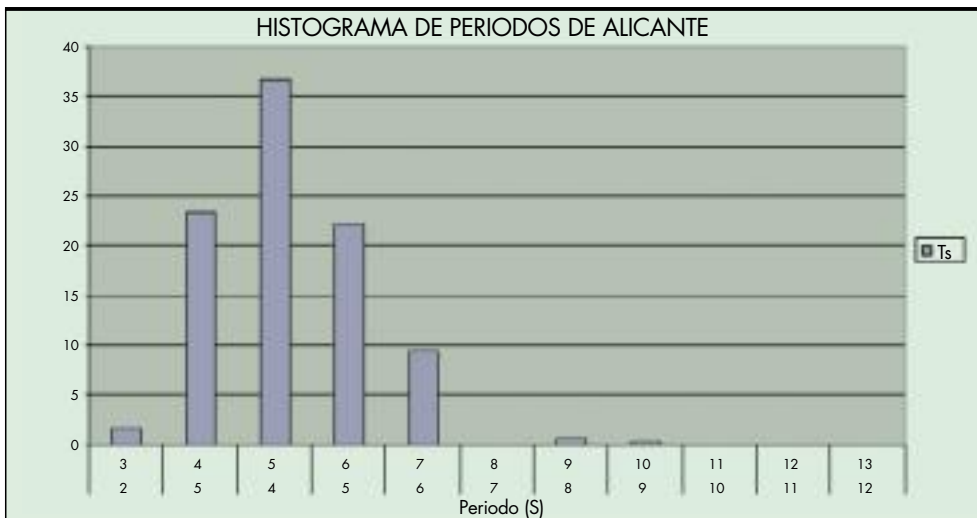


FIGURA 5. Histograma de Periodos Alicante.

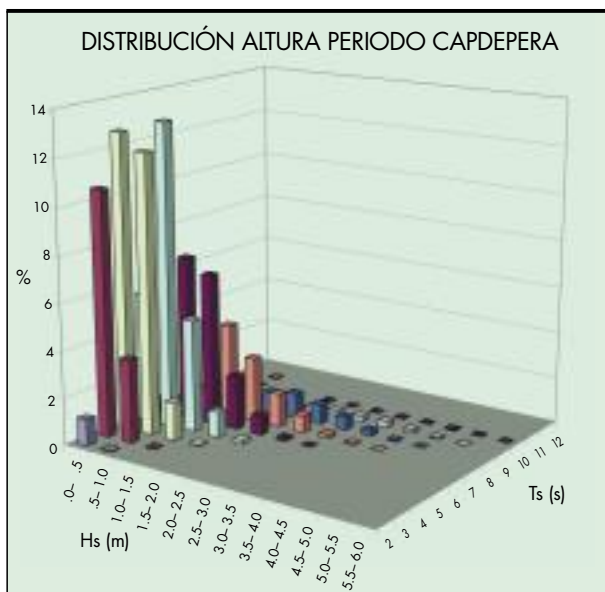


FIGURA 7. Distribución Conjunta Capdepera.

El rango de alturas es de 0 a 6 m. y el de periodos de 2 a 11 s.
El 67,9% de las alturas son menores de un metro y el 83% de los periodos están en el intervalos [3,7].

La boya de Cabo de Gata está fondeada en las siguientes coordenadas: latitud 36° 42,78' N, longitud 2° 12,15' W y un calado 35 m.

La fecha de inicio de la toma de datos es agosto de 1988 y termina en diciembre de 2008.

El rango de alturas es de 0 a 5 m. y el de periodos de 2 a 11 s.
El 80,78% de las alturas son menores de un metro y el 95% de los periodos están en el intervalo [3,7].

La boya de Málaga esta fondeada en las coordenadas siguientes: latitud 36° 41,50' N, longitud 4° 24,90' W y un calado de 22 m.

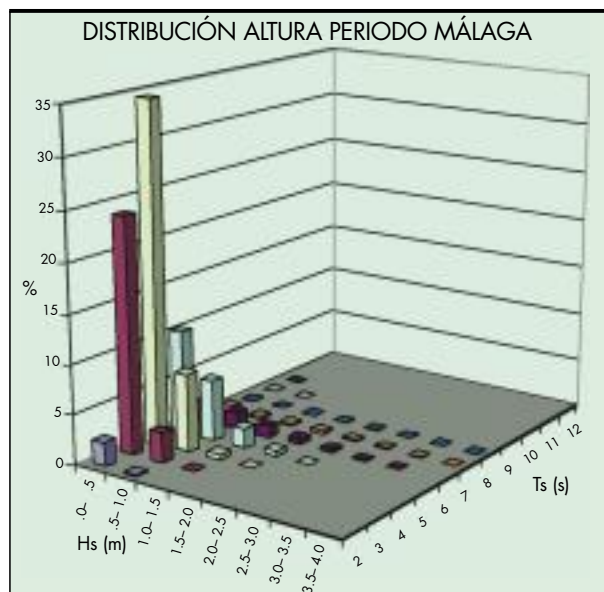


FIGURA 9. Distribución Conjunta Málaga.

El periodo de tiempo estudiado es desde enero de 1986 a diciembre de 2008.

El rango de alturas es 0 a 4 metros y el de periodos de 2 a 11 s.
El 93,7% de las alturas son menores de un metro y el 95,5% de los periodos están en el intervalo [3,7].

La boya de Algeciras estaba fondeada en las coordenadas: latitud 36° 9,73' N, longitud 5° 23,37' W y un calado de 84 metros.

El periodo de medida estudiado es desde enero de 2000 hasta diciembre de 2005.

El rango de alturas es de 0 a 1,5 m. y el de periodos de 2 a 10 s.
El 99,4% de las alturas son menores e un metro y el 94,3% de los periodos están en el intervalo [3,7].

La boya de Ceuta está fondeada en las coordenadas siguientes: latitud 35° 54,17' N, longitud 5° 19,85' W y un calado de 21 m.

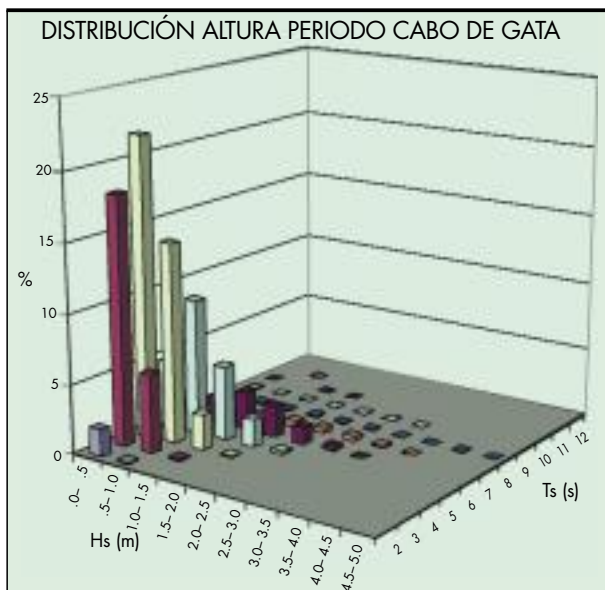


FIGURA 8. Distribución Conjunta Cabo de Gata.

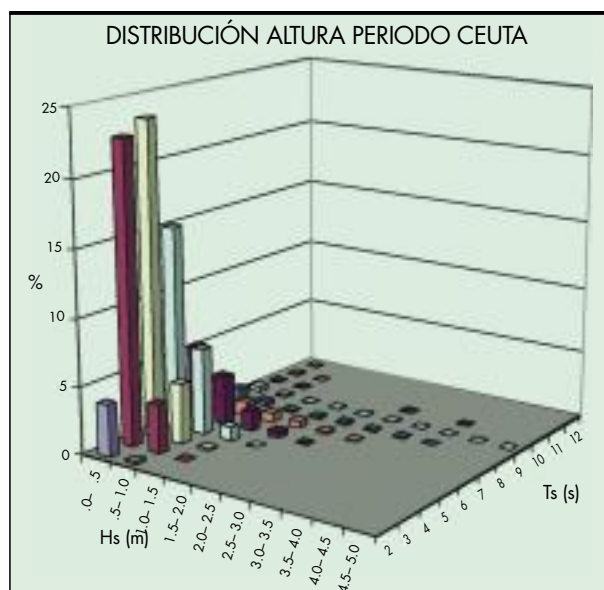


FIGURA 10. Distribución Conjunta Ceuta.

MATRIZ DE DOBLE ENTRADA: ALTURA - PERIODO ZONA: ALGECIRAS																								
Fecha inicio = 2000- 1 Fecha Final =2005-12 N. de meses = 49 Variables: Hzs (m) – Tzs(s)																								
periodos																								
alturas	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	22-23	Total		
.0- .5	4.57	27.10	31.44	23.37	5.93	0.58	0.04																93.05	
.5- 1.0		0.98	1.54	2.25	1.22	0.31	0.06	0.01															6.38	
1.0- 1.5		0.02	0.07	0.11	0.26	0.10	0.02																0.56	
1.5- 2.0																							0.01	
2.0- 2.5																								
2.5- 3.0																								
3.0- 3.5																							0.16	
3.5- 4.0																							0.05	
4.0- 4.5																								
4.5- 5.0																								
5.0- 5.5																								
5.5- 6.0																								
6.0- 6.5																								
6.5- 7.0																								
7.0- 7.5																								
7.5- 8.0																								
8.0- 8.5																								
8.5- 9.0																								
9.0- 9.5																								
9.5- 10.0																								
10.0- 10.5																								
10.5- 11.0																								
11.0- 11.5																								
11.5- 12.0																								
Total	4.57	28.10	33.05	25.73	7.41	1.00	0.12	0.01															100.-	

TABLA 3. Matriz Altura- Período Algeciras.

El periodo de estudio es desde febrero de 1986 hasta diciembre de 2008.

El rango de alturas es de 0 a 5 m. y el de periodos de 2 a 13 s.

El 94,6% de las alturas son menores de 1 m. y el 88,4% de los periodos están en el intervalo [3,7] s.

La boya de Melilla está fondeada en las coordenadas: latitud 35° 19,14' N, longitud 2° 56,6' W y calado 15 m.

El periodo de estudio es desde enero de 2008 a diciembre de 2008.

El rango de alturas es de 0 a 4,5 m. y el de periodos de 2 a 10 s.

El 87,8% de las alturas son menores de un metro y el 92,82% de los periodos están en el intervalo [3,7] s.

COMPARACIÓN DEL LITORAL MEDITERRÁNEO

Rango de alturas y periodos:

Gerona:	0 – 5,5 m. y 2 – 11 s.
Barcelona:	0 – 4,0 m. y 2 – 13 s.
Tarragona:	0 – 3,5 m. y 2 – 12 s.
Valencia:	0 – 4,0 m. y 2 – 13 s.
Alicante:	0 – 4,5 m. y 2 – 12 s.
Cartagena:	0 – 5,5 m. y 2 – 12 s.
Capdepera:	0 – 6,0 m. y 2 – 11 s.
Cabo de Gata:	0 – 5,0 m. y 2 – 11 s.
Málaga:	0 – 4,0 m. y 2 – 11 s.
Algeciras:	0 – 1,5 m. y 2 – 10 s.
Ceuta:	0 – 5,0 m. y 2 – 13 s.
Melilla:	0 – 4,5 m. y 2 – 10 s.

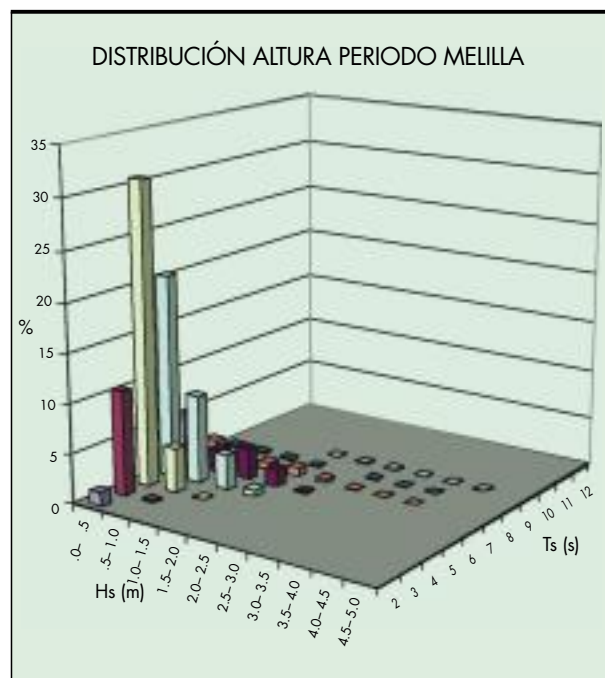


FIGURA 11. Distribución Conjunta Melilla.

	2	3	4	5	6	7	8
	3	4	5	6	7	8	9
.0- .5	A1,1	A1,2	A1,3	A1,4	A1,5	A1,6	A1,7
.5- 1.0	A2,1	A2,2	A2,3	A2,4	A2,5	A2,6	A2,7
1.0- 1.5	A3,1	A3,2	A3,3	A3,4	A3,5	A3,6	A3,7
1.5- 2.0	A4,1	A4,2	A4,3	A4,4	A4,5	A4,6	A4,7
2.0- 2.5	A5,1	A5,2	A5,3	A5,4	A5,5	A5,6	A5,7

TABLA 4. Designación de cuadrículas.

Porcentaje de olas menores de un metro

Gerona:	72,3%
Barcelona:	82,6%
Tarragona:	93,5%
Valencia:	90,5%
Alicante:	86,6%
Cartagena:	74,0%
Capdepera:	67,9%
Cabo de Gata:	80,8%
Málaga:	93,7%
Algeciras:	99,4%
Ceuta:	94,6%
Melilla:	87,8%

Porcentaje de periodos en el intervalo [3,7]s.

Gerona:	92%
Barcelona:	91%
Tarragona:	93%
Valencia:	93%
Alicante:	92%
Cartagena:	91%
Capdepera:	83%
Cabo de Gata:	81%
Málaga:	96%
Algeciras:	94%
Ceuta:	84%
Melilla:	93%

Comparación de intervalos de mayor frecuencia (Tabla 5).

Cuando observamos las gráficas de la distribución conjunta, notamos que hay un valor modal y otros de frecuencias algo más bajas que destacan sobre el resto, vamos a poner en una tabla los valores de la moda y las dos frecuencias relativas inferiores.

Para comparar las gráficas de las distribuciones conjuntas las cada cuadrícula del plano altura-periodo las vamos a denominar cada cuadrícula con una notación matricial siguiendo el modelo de la tabla 4.

Aunque las funciones de distribución son diferentes para cada estación vemos que coinciden en la moda 9 estaciones, en la siguiente columna 7 y en la siguiente 6.

2.2. CANTÁBRICO

La boya de Bilbao estaba fondeada en las coordenadas: latitud 43° 24,0' N, longitud 3° 8,6' W y calado 50 m.

El periodo de estudio es desde enero de 1986 a diciembre de 2005.

El rango de alturas es de 0 a 6,5 m. y el de periodos de 2 a 18 s.

El 41,69% de las alturas son menores de un metro y el 33,44% de los periodos están en el intervalo [3,7]s.

ESTACIÓN	MODA		
Gerona	A2,3	A1,3	A2,4
Barcelona	A1,3	A2,4	A2,3
Tarragona	A1,3	A1,2	A1,4
Valencia	A1,3	A1,2	A2,3
Alicante	A1,3	A1,2	A2,3
Cartagena	A2,3	A2,4	A1,3
Capdepera	A2,4	A1,3	A2,3
C. Gata	A1,3	A1,2	A2,3
Málaga	A1,3	A1,2	A2,3
Algeciras	A1,3	A1,2	A1,4
Ceuta	A1,3	A1,2	A1,4
Melilla	A1,3	A1,4	A1,2

TABLA 5. Frecuencias relativas mayores en el Mediterráneo.

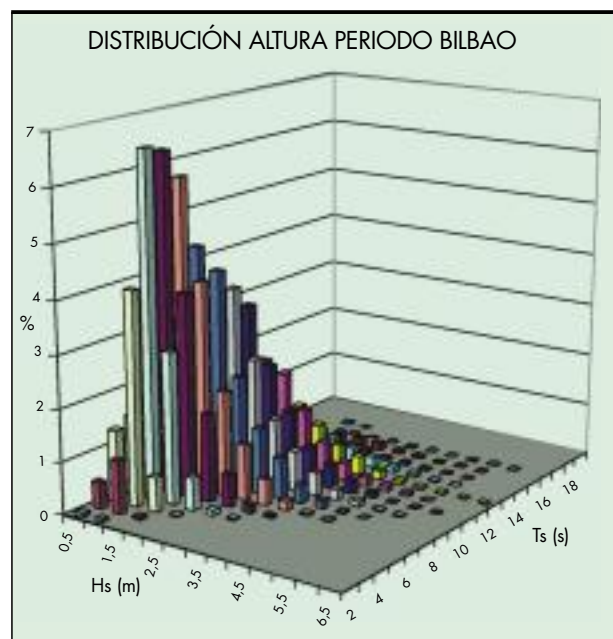


FIGURA 12. Distribución Conjunta Bilbao.

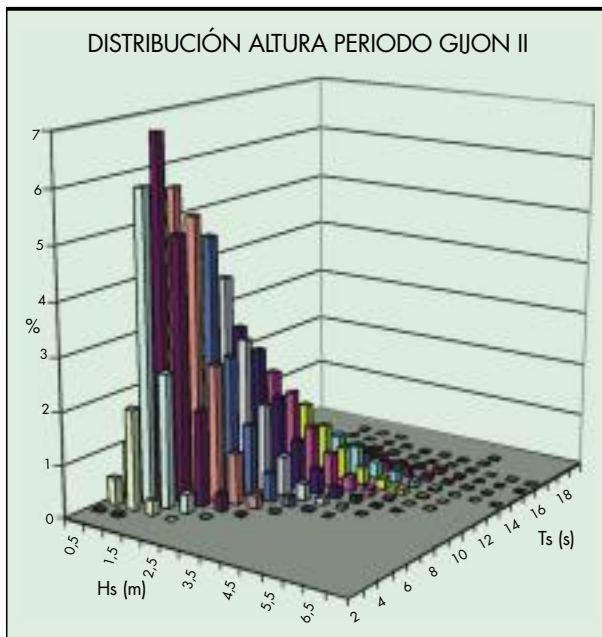


FIGURA 13. Distribución Conjunta Gijón II.

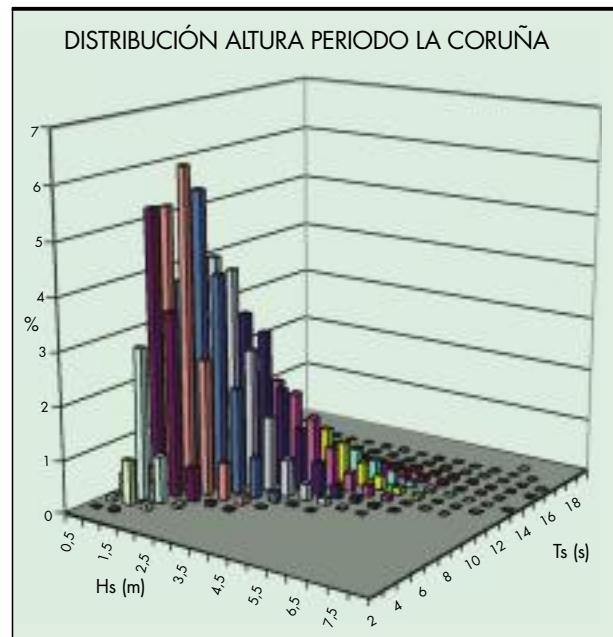


FIGURA 14. Distribución Conjunta La Coruña.

ESTACIÓN	MODA		
Bilbao	A2,4	A2,5	A2,6
Gijón II	A2,5	A2,4	A2,6

TABLA 6. Frecuencias relativas mayores en el Cantábrico.

La boya de Gijón II estaba fondeada en las coordenadas: latitud $43^{\circ} 36,7' N$, longitud $5^{\circ} 40,0' W$ y calado 43 m.

El periodo de estudio es desde marzo de 1994 a diciembre de 2008.

El rango de alturas es de 0 a 7 m. y el de periodos de 3 a 19 s.

El 32,87% de las alturas son menores de un metro y el 27,72% de los periodos están en el intervalo [3,7]s.

COMPARACIÓN CANTÁBRICO

Rango de alturas y periodos:

Bilbao 0 a 6,5 m. y 2 a 18 s.

Gijón II 0 a 7,0 m. y 3 a 19 s.

Porcentaje de alturas menores de un metro:

Bilbao 41,59%

Gijón II 32,87%

Periodos en el intervalo [3,7] s.

Bilbao 33,44%

Gijón II 27,72%

Comparación de intervalos de mayor frecuencia (Tabla 6).

Los intervalos de mayor frecuencia son los mismos, en Bilbao la moda es la cuadrícula A2,4 y en Gijón II, en la segunda frecuencia Bilbao A2,5 y Gijón A2,4 y para la tercera frecuencia es A2,6 en ambos.

2.3. ATLÁNTICO

La boya de La Coruña está fondeada en las coordenadas: latitud $43^{\circ} 24,67' N$, longitud $8^{\circ} 23,0' W$ y calado 50 m.

El periodo de estudio es desde enero de 1986 a diciembre de 2008.

El rango de alturas es de 0 a 8 m. y el de periodos de 3 a 19 s.

El 23,65% de las alturas son menores de un metro y el 15,59% de los periodos están en el intervalo [3,7] s.

La boya de Cabo Silleiro está fondeada en las coordenadas: latitud $42^{\circ} 5,85' N$, longitud $8^{\circ} 55,85' W$ y calado 75 m.

El periodo de estudio es desde marzo de 1986 a diciembre de 2006.

El rango de alturas es de 0 a 8 m. y el de periodos de 3 a 19 s.

El 24,32% de las alturas son menores de un metro y el 17,38% de los periodos están en el intervalo [3,7] s.

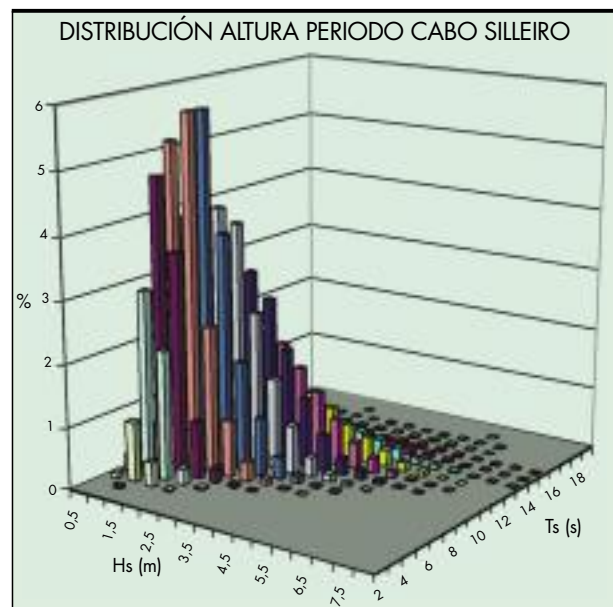


FIGURA 15. Distribución Conjunta Cabo Silleiro.

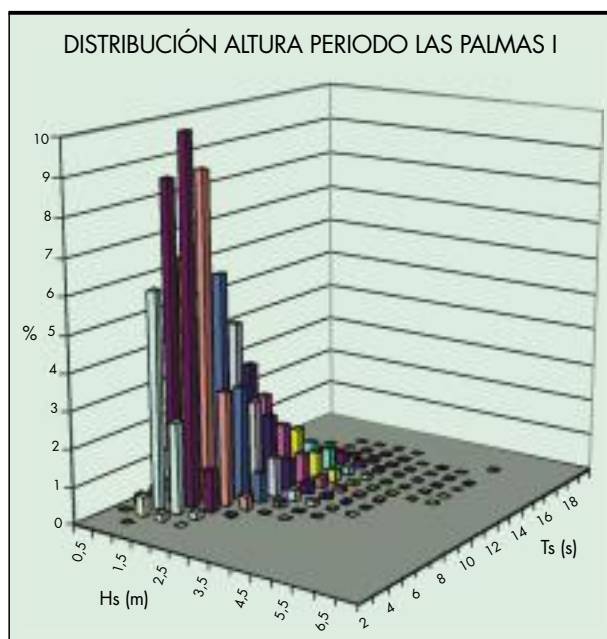


FIGURA 16. Distribución Conjunta Las Palmas I.

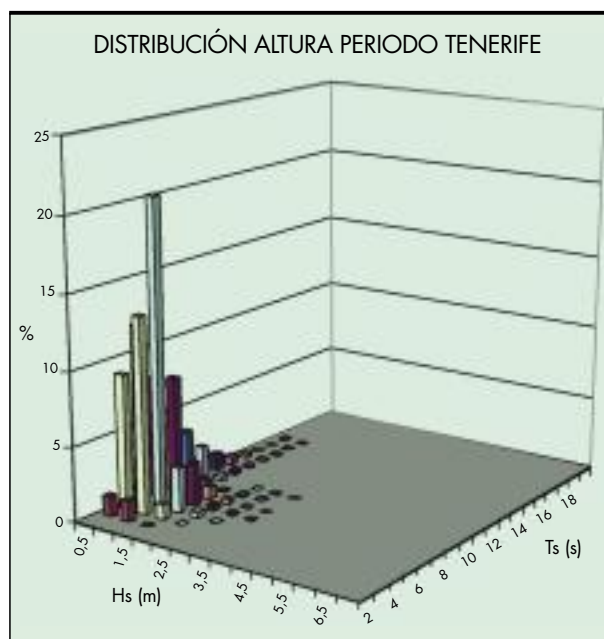


FIGURA 18. Distribución Conjunta Tenerife.

La boya de Las Palmas está fondeada en las coordenadas: latitud $28^{\circ} 8,50' N$, longitud $15^{\circ} 27,50' W$ y calado 24 m.

El periodo de estudio es desde febrero de 1986 a diciembre de 2008.

El rango de alturas es de 0 a 5,5 m. y el de periodos de 3 a 18 s.

El 35,06% de las alturas son menores de un metro y el 29,78% de los periodos están en el intervalo [3,7]s.

La boya de Las Palmas II (Gran Canaria) está fondeada en las coordenadas: latitud $28^{\circ} 4,0' N$, longitud $15^{\circ} 23,84' W$ y calado 50 m.

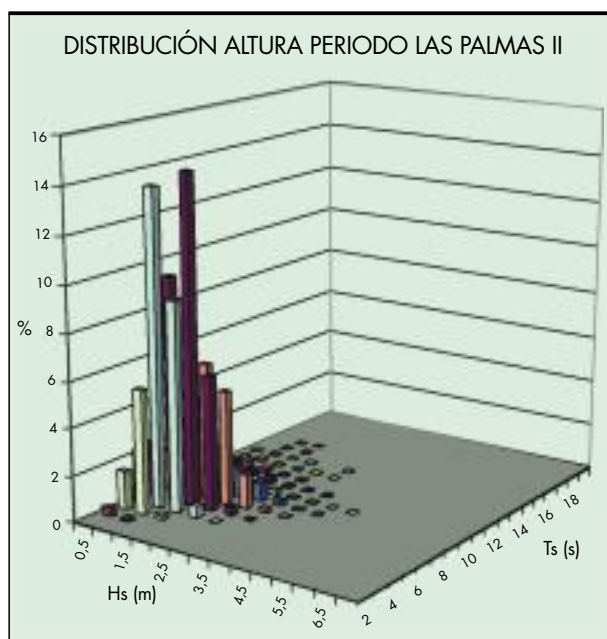


FIGURA 17. Distribución Conjunta Las Palmas II.

El periodo de estudio es desde noviembre de 1990 a diciembre de 2008.

El rango de alturas es de 0 a 4,5 m. y el de periodos de 3 a 16 s.

El 50,17% de las alturas son menores de un metro y el 65,88% de los periodos están en el intervalo [3,7] s.

La boya de Tenerife está fondeada en las coordenadas: latitud $28^{\circ} 27,1' N$, longitud $16^{\circ} 14,9' W$ y calado 52 m.

El periodo de estudio es desde enero de 1986 a diciembre de 2008.

El rango de alturas es de 0 a 3 m. y el de periodos de 3 a 16 s.

El 90,74% de las alturas son menores de un metro y el 82,52% de los periodos están en el intervalo [3,7]s.

COMPARACIÓN ATLÁNTICO

Rango de alturas y periodos:

La Coruña	0 a 8,0 m. y 3 a 19 s.
Cabo Silleiro	0 a 8,0 m. y 3 a 19 s.
Las Palmas I	0 a 5,5 m. y 3 a 18 s.
Las Palmas II	0 a 4,5 m. y 3 a 16 s.
Tenerife	0 a 3,0 m. y 3 a 16 s.

Porcentaje de olas menores de un metro:

La Coruña	23,65%
Cabo Silleiro	24,32%
Las Palmas I	35,06%
Las Palmas II	50,17%
Tenerife	90,74%

Periodos en el intervalo [3,7] s.

La Coruña	15,59%
Cabo Silleiro	17,38%
Las Palmas I	29,78%
Las Palmas II	65,88%
Tenerife	82,52%

Comparación de intervalos de mayor frecuencia (Tabla 7).

Las mayores frecuencias en La Coruña y C. Silleiro coinciden la primera y segunda. En las Palmas I y II coinciden la primera frecuencia y la tercera. Tenerife no coincide con ninguna estación del Atlántico.

ESTACIÓN	MODA		
La Coruña	A3,6	A3,7	A2,5
C. Silleiro	A3,6	A3,7	A2,6
Las Palmas I	A3,5	A3,6	A2,5
Las Palmas II	A3,5	A2,4	A2,5
Tenerife	A2,4	A2,3	A1,4

TABLA 7. Frecuencias relativas mayores en el Atlántico.

2.4. GOLFO DE CÁDIZ

La boya denominada Sevilla está fondeada en el termino de Chipiona (Cádiz) las coordenadas: latitud $36^{\circ} 44,3' N$, longitud $6^{\circ} 28,5' W$ y calado 10 m.

El periodo de estudio es desde febrero de 1986 a diciembre de 2008.

El rango de alturas es de 0 a 4 m. y el de periodos de 2 a 17 s.

El 83,63% de las alturas son menores de un metro y el 73,84% de los periodos están en el intervalo [3,7] s.

La boya de Cádiz estaba fondeada en las coordenadas: latitud $36^{\circ} 30,0' N$, longitud $6^{\circ} 20,0' W$ y calado 22 m.

El periodo de estudio es desde enero de 1986 a diciembre de 2003.

El rango de alturas es de 0 a 5,5 m. y el de periodos de 2 a 17 s.

El 75,44% de las alturas son menores de un metro y el 72,86% de los periodos están en el intervalo [3,7]s.

COMPARACIÓN GOLFO DE CÁDIZ

Rango de alturas y periodos:

Sevilla	0 a 4,0 y 2 a 17 s.
Cádiz	0 a 5,5 y 2 a 17 s.

Porcentaje de alturas menores de un metro:

Sevilla	83,63%
Cádiz	75,44%

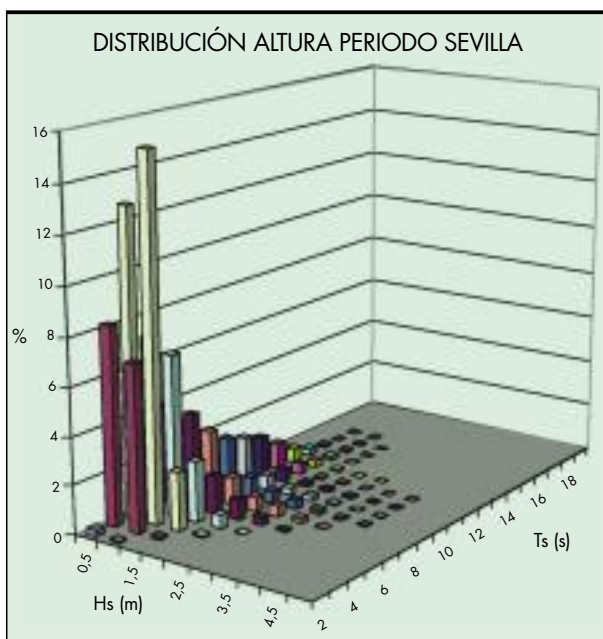


FIGURA 19. Distribución Conjunta Sevilla.

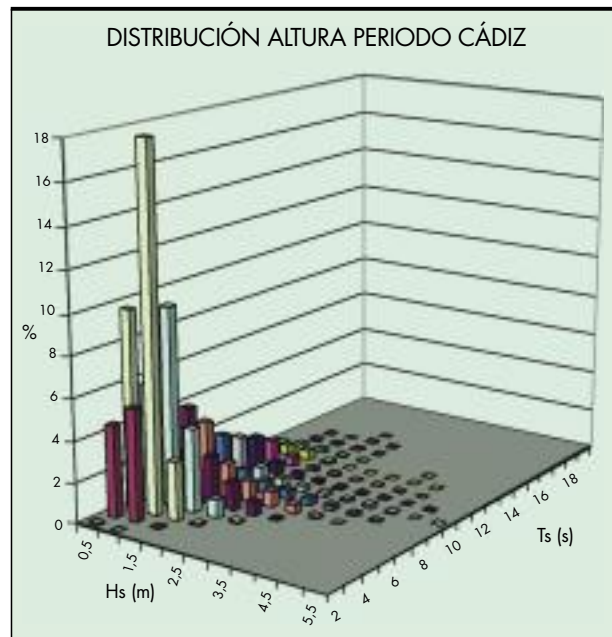


FIGURA 20. Distribución Conjunta Cádiz

ESTACIÓN	MODA		
Sevilla	A2,3	A1,3	A1,2
Cádiz	A2,3	A2,4	A1,3

TABLA 8. Frecuencias relativas mayores en el Golfo de Cádiz.

Periodos en el intervalo [3,7] s.

Sevilla	73,84%
Cádiz	72,86%

Comparación de intervalos de mayor frecuencia (Tabla 8).

Tienen la misma moda A2,3 que destaca de la segunda frecuencia.

3. SUMARIO Y CONCLUSIONES

Hemos introducido el tema con la descripción de la generación del oleaje por fricción de viento con la superficie del mar y la propagación desde el área de generación hasta la costa. A continuación un repaso de las teorías clásicas de oleaje: Airy, Gerstner, Stokes y Cnoidal. Por último para estudiar el oleaje hemos considerado que es un proceso estacionario gaussiano débilmente ergódico.

Después de un repaso a los estudios teóricos de diferentes propuestas analíticas para describir el comportamiento estadístico conjunto de altura periodo: Cavanie et al. (1976), Lindgren-Rychik (1982) y Longuet-Higgins (1983). Hemos descrito, a partir de series de oleaje medidas en la naturaleza, la función de distribución conjunta altura periodo en varias áreas del litoral español que varios años de toma de datos. En las tablas o gráficas no se representan los pares altura-periodo cuya frecuencia relativa porcentual es menor de 0,01%

Para comparar las gráficas de las distribuciones conjuntas las cuadrículas del plano altura-periodo las vamos a denominar con una notación matricial como hemos visto en la tabla 4.



FOTO 2. Playa de Foz (M. Sotillo)



FOTO 3. Barres, Castropol (M. Sotillo).

Hemos hecho una tablas con las clases de mayor frecuencia de presentación.

En el Mediterráneo en la tabla 5 aparecen sólo 5 clases. Nueve estaciones tienen de moda A1,3 que corresponde a alturas menores de 0,5 m. y periodos en el intervalo [4,5)s. Siete coinciden también en la segunda frecuencia y 5 en la tercera.

En el Cantábrico los intervalos de mayor frecuencia son los mismos, en Bilbao la moda es la cuadrícula A2,4 y en Gijón II, en la segunda frecuencia Bilbao A2,5 y Gijón A2,4 y para la tercera frecuencia es A2,6 en ambos (Tabla 6).

En el Atlántico las mayores frecuencias relativas en La Coruña y C. Silleiro coinciden la primera y segunda. En las Palmas I y II coinciden la primera frecuencia y la tercera. Tenerife no coincide con ninguna estación del Atlántico.

Golfo de Cádiz las mayores frecuencias relativas tienen la misma moda A2,3 que destaca de la segunda frecuencia.

Como podemos ver las tres frecuencias relativas mayores en todas las estaciones estudiadas están en 10 clases (cuadrículas). Si nos fijamos sólo en la moda de cada distribución tenemos A1,3 (9 estaciones), A2,3 (4 estaciones), A2,4 (3 estaciones), A2,5 (una estación), A3,5 (2 estaciones) y A3,6 (3 estaciones).

4. BIBLIOGRAFÍA

MARTÍNEZ M., SOTILLO M. <REMRO Datos de Oleaje> Centro de Estudios de Puertos y Costas. Cedex. Madrid 1993-2008.

OCHI.<Stochastic Analysis and Probabilistic Prediction of Random Seas. Advances in Hydrosience> V-13. 1982.

SOTILLO MEMBIBRE M. <Temporales en el litoral español:Relación entre altura de ola máxima y altura significativa>.Ingeniería Civil nº 88 /1993.



FOTO 4. Isla de Mouro y península de la Magdalena, Santander (M. Sotillo).