

CARACTERIZACIÓN DEL OLEAJE EN LAS AGUAS COSTERAS DEL CANTÁBRICO

Francisco Javier ORTIZ BERENGUER; José Luis ARTECHE GARCÍA y Pilar SANZ MORAL
Centro Meteorológico Territorial en Cantabria y Asturias, Instituto Nacional de Meteorología

RESUMEN

En este trabajo, se muestra cómo se modifica el oleaje al entrar en las aguas costeras del Cantábrico debido a su refracción en aguas someras. Asimismo, se incluye una breve descripción, tanto geográfica como climatológica, de la zona marítima de estudio.

Palabras clave: Mar de viento, mar de fondo, refracción, aguas profundas, aguas someras.

ABSTRAT

This text aims to explain how the surge is modified when it comes into coastal waters, in Cantabrian Sea (North of Spain), because of the refraction's surge in shallow waters. It also contains a brief description of maritime study area, both climatologic and geographic.

Key words: *Wind shaf, swell refraction, deep waters, shallow waters.*

1. INTRODUCCIÓN

Se define como estado de la mar aquella situación o período de tiempo, en el cual existe un equilibrio entre las fuerzas generadoras y las restauradoras que intervienen, permaneciendo su manifestación aproximadamente estacionaria. Puede definirse como cada una de las "posiciones" de la dinámica del oleaje. La variación es lo suficientemente lenta para admitir que el proceso es estacionario durante un corto período.

Un estado de mar puede ser representado por una altura significativa, un período significativo y su dirección de propagación. Por valores significativos nos referimos al promedio del tercio de las olas más altas.

Lo que nos interesa conocer es el oleaje real. Hay que distinguir tres zonas en el desarrollo del oleaje: área generadora, área de propagación y su extinción en la costa. El oleaje real puede ser concebido como una combinación de ondas sinusoidales (componentes) que se propagan independientemente unas de otras. A pesar que cada una de las crestas avanza a una velocidad que corresponde a su longitud de onda (velocidad de fase), como unidad coherente el grupo avanza con su propia velocidad (velocidad de grupo). Estos grupos pueden ser considerados como portadores de la energía de las olas.

Podemos distinguir dos tipos de mar:

- **Mar de viento:** Se produce en las zonas generadoras debido a la acción del viento, donde no se aprecian crestas de cierta longitud ni período bien definido. Es muy irregular, con crestas de

pequeña longitud y gran variedad de direcciones de avance, que constituyen una superficie líquida caótica sin frentes de crestas bien definidos y sin ninguna periodicidad. No se puede medir un período ni una altura bien definidos (no son constantes).

- **Mar de fondo:** Al abandonar la zona generadora el oleaje sufre tres fenómenos: pérdida de energía, dispersión angular y radial y soldadura. Así pues, la caótica superficie de la mar de viento va simplificándose con el aumento de la edad del oleaje (distancia al origen de la perturbación) y especialmente cuando abandona la zona generadora. El oleaje que aborda la costa es más regular, se forman frentes de crestas de centenares de metros de longitud y el período de las olas sucesivas difiere poco. Hay ciertas direcciones predominantes y ritmicidad en el fenómeno. La altura varía poco entre dos olas consecutivas.

Mediante los modelos de olas (manual o numérico) se trata de organizar los conocimientos teóricos y prácticos sobre las olas. Estos modelos pueden ser utilizados para sustituir los datos ausentes. Sabemos que la descripción matemática de las olas exige una descripción estadística y espectral. El elemento que describe el campo de olas es el espectro de densidad de energía, tanto en frecuencia o período como en dirección $E(f, \theta)$. Así, cada componente puede ser considerada como una onda sinusoidal de la cual tenemos una teoría bien comprendida. Existe un concepto razonable de los procesos físicos que pueden controlar los campos de olas.

2. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La zona geográfica de estudio es la correspondiente a la zona costera española del Mar Cantábrico (entre Estaca de Bares a cabo Higuer y entre la costa hasta las 20 millas náuticas). Nos interesa conocer la batimetría (profundidades) de dicha zona, para lo cual tenemos el siguiente mapa suavizado de la batimetría del Mar Cantábrico:

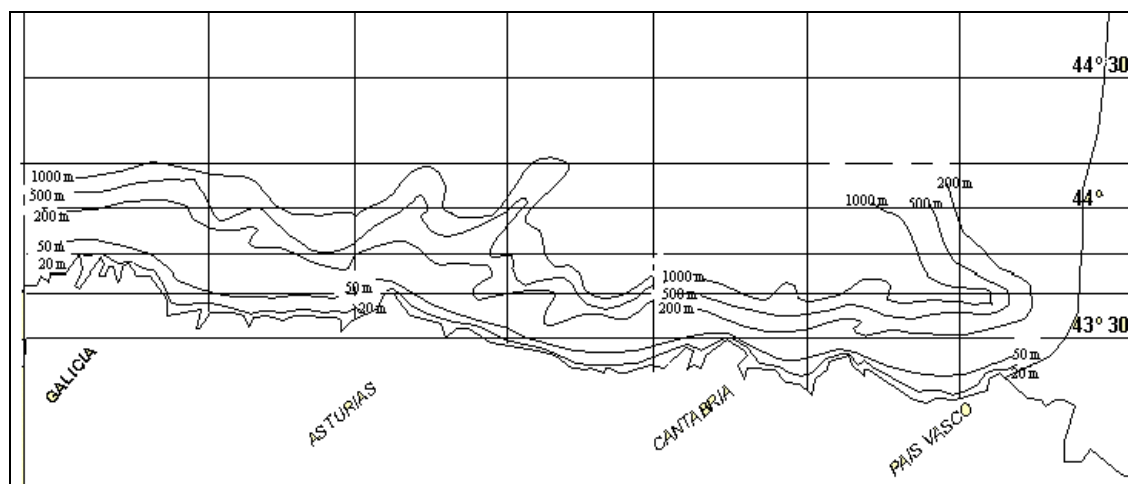


Fig. 1. Batimetría de las aguas costeras del Mar Cantábrico (20,50,200,500 y 1.000 m)

Los parámetros que definen una onda pueden cambiar según la profundidad del fondo marino. Este cambio depende de la relación d/L , siendo d la profundidad del fondo marino y L la longitud de onda. Cuando $d/L > 0,5$, la influencia del fondo en el movimiento de las partículas de agua puede considerarse despreciable para una ola de longitud de onda L . Así pues, el agua se llama **profunda** con respecto a determinadas olas superficiales cuando $d/L > 0,5$ y **somera** cuando $d/L \leq 0,5$, en este último caso la influencia del fondo en las olas es ya significativa (la ola "siente el fondo"). Dentro de las aguas someras hay **aguas poco profundas** ($d/L \leq 0,05$) y **aguas en profundidades intermedias o de transición** ($0,05 < d/L \leq 0,5$). Es en las aguas someras, más cercanas a la costa, donde se producen fenómenos como el de la refracción del oleaje que lo modifica. El estudio de dicho fenómeno es el objeto de este trabajo.

De los datos de los vientos y del oleaje en las aguas costeras del Cantábrico archivados en el Centro Meteorológico de Santander (obtenidos de la información de colaboradores, estaciones automáticas y de la red de boyas de Puertos del Estado), podemos hablar de ciertas características climatológicas de las aguas costeras del Cantábrico: dominan los vientos de componente oeste (sobre todo entre el WSW y WNW) y oleaje del cuarto cuadrante (sobre todo entre el NW y N). Esta diferencia nos indica la importancia de la presencia de una mar de fondo entre el NW y el N proveniente de temporales atlánticos por encima de los 45° - 50° N.

En la siguiente tabla tenemos las frecuencias relativas según la altura significativa y el período significativo. Vemos que domina el oleaje inferior a los 2 m y entre los 8 y 12 segundos. Hay un claro dominio del oleaje de mar de fondo. Los valores corresponden al estado de la mar medio en toda la zona de las aguas costeras del Cantábrico. Si bien apenas hay diferencias en el período entre las distintas zonas, hay una menor altura de las olas en la mitad oriental del Cantábrico (Golfo de Vizcaya) que en la occidental (costa occidental asturiana).

Tabla 1. Frecuencias relativas según altura y período

H	T				
		Corta (≤ 8 seg)	Regular ($8 \text{ seg} < T < 12 \text{ seg}$)	Larga ($\geq 12 \text{ seg}$)	Total
≤ 2 m.		19,8%	39,9%	7,7%	67,4%
2-4 m.		2,3%	14,1%	11,1%	27,5%
≥ 4 m.		-	1,2%	3,9%	5,1%
Total		22,1%	55,2%	22,7%	100%

3. REFRACCIÓN DEL OLEAJE

Según la teoría linealizada del movimiento ondulatorio, la celeridad o velocidad de fase de la onda viene dada por:

$$c = \frac{gT}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{L} = \frac{gT}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{cT} \quad (1)$$

Donde d es la profundidad del agua. Con lo que se comprueba que la velocidad de fase crece con la profundidad, con lo que la longitud de onda ($L = cT$) también crecerá con dicha profundidad.

Suponiendo una plataforma costera con batimétricas paralelas, al incidir oblicuamente en ella un tren de ondas, se puede observar variaciones en la velocidad de las ondas a lo largo de las crestas porque la parte de cresta en aguas profundas se mueve más deprisa que la parte en aguas someras. En consecuencia, las envolventes de las sucesivas posiciones en el tiempo de las líneas de cresta serán curvas, tendiendo, en el límite, a situarse paralelas a las batimétricas y, en último término, a la línea de costa.

Este fenómeno se llama **refracción**, y depende de la relación d/L , siendo análoga a la refracción de otros tipos de ondas tales como las de la luz y sonido. En estos casos, la variación en dirección y velocidad se debe al cambio de densidad del medio en que se propagan; en el mar, lo que varía es la profundidad.

El estudio de la refracción nos permite obtener:

- a) **La altura de onda** en un determinado punto, para un determinado frente de ondas entrante y cuyas características (dirección, altura y período) se conocen en aguas profundas.
- b) El cambio en **la dirección de propagación** de cada uno de los puntos del frente y, por tanto, la convergencia o divergencia de la energía de la onda al acercarse a la costa.

Además de la refracción producida por la variación de la profundidad marina, las ondas pueden ser refractadas por cualquier otro fenómeno que origine el que una zona del frente vaya más deprisa que otra. Entre estos, podemos citar las corrientes marinas, los vientos, el rozamiento con el fondo, la rotura de las ondas, etc.

El efecto de la refracción es distinto para ciertas zona, dependiendo de la batimetría y de los accidentes geográficos (cabos, bahías, orientación de la costa, etc).

4. ESTUDIO PRÁCTICO EN LAS AGUAS SOMERAS DEL CANTÁBRICO

El objetivo de este trabajo experimental es obtener la altura de onda en puntos determinados del mar, cercanos a la costa, para un frente de ondas que llega y cuyas características - dirección, período y altura - se conocen en aguas profundas. Se suponen ondas simples, de período constante y de crestas largas.

Como causa de refracción se ha tenido en cuenta únicamente la variación de profundidades marinas, despreciándose otras como la acción del viento, la percolación, turbulencia del fondo, corrientes, rozamiento con el fondo o rotura de las crestas de las ondas de período corto.

Puesto que la superficie del fondo no es susceptible de ser representada analíticamente, en general, la resolución del problema exige la integración por métodos numéricos aproximados. Esta integración se basa en la obtención de las coordenadas de los puntos P_1, \dots, P_n de una normal y en la obtención de la altura de la onda u ola H_1, \dots, H_n en los mismos puntos, utilizando una serie de

ecuaciones (para una mayor información del método de las ortogonales ver los trabajos referenciados en la bibliografía) para calcular el trazado de las ortogonales, la velocidad de fase y la altura en cada punto. La altura de onda en un punto de la ortogonal será :

$$H = H_0 K_s K_r$$

K_s se conoce como el *coeficiente de aproximación* o el efecto de la profundidad escasa. K_r se conoce como el *coeficiente de refracción o de expansión frontal*. Esta ecuación constituye la base de todos los métodos elementales de predicción de la variación de la altura de las olas cuando éstas se desplazan desde aguas profundas hacia aguas de profundidad escasa y variable. Esta ecuación combina el efecto de la débil profundidad con el de la refracción.

El planteamiento matemático del método de las ortogonales consiste en el cálculo de las ecuaciones a lo largo de la traza de las ortogonales, el cálculo de la velocidad de fase y de la altura de la ola en un punto fijado. En este estudio nos limitaremos a dar una idea de las condiciones elegidas para la realización del estudio de la refracción en aguas del Cantábrico y una interpretación de los resultados obtenidos. El estudio se realiza mediante un programa informático que resuelve numéricamente las ecuaciones del método de las ortogonales.

4.1. Condiciones iniciales y objetivas

Se estudian frentes de ondas entrantes con distintos períodos y direcciones. Se calcula el porcentaje H/H_0 que llega a la costa. En este sentido, consideraremos costa a los puntos cercanos a ella, con profundidades entre los 2-5 m. Para profundidades menores empiezan a ser importantes los efectos de rozamiento con el fondo y el de rotura de las crestas en dicha zona de rompientes.

Se estudian tres tipos de ondas, según el período:

- **Onda corta ($T \leq 8$ seg):** Se elige el valor $T = 7$ seg
- **Onda regular ($8 < T < 12$ seg):** Se elige el valor $T = 10$ seg
- **Onda larga ($T \geq 12$ seg):** Se elige el valor $T = 13$ seg

En cuanto a las direcciones, se estudian las que tienen entrada libre a la costa española del Mar Cantábrico desde el Océano Atlántico:

- **Oeste (W):** 280°, 285°, 290°
- **Noroeste (NW):** 300°, 310°, 320°, 330°

Se calcula el porcentaje de altura que llega a la costa española del Mar Cantábrico para cada período y dirección individual y se presentan los resultados gráficamente según la dirección (W y NW) y el período (Corta, Regular y Larga). En cuanto a la dirección, se calcula el porcentaje de altura para cada dirección individual y se agrupan calculando la media aritmética.

El programa nos da los datos de todos los puntos (x_n, y_n) de la ortogonal al frente de onda en su tránsito desde aguas profundas hasta la línea de costa. Nos da las coordenadas (x_n, y_n), el ángulo α_n y la altura H_n de cada punto de la ortogonal, de forma que podemos trazar la trayectoria de las

ortogonales a los frentes de ondas para diferentes ángulos de incidencia y períodos, a partir de distintas posiciones iniciales.

4.2. Análisis de los resultados

Nos interesa conocer el porcentaje de altura H/H_0 que llega a la costa en toda nuestra zona de estudio, para las distintas condiciones iniciales de dirección y período definidas en el apartado 4.1. Para ello, desde cada posición inicial (x_0, y_0) se eligen distintos tipos de ondas y se calcula el porcentaje de altura que nos llega a la costa. Este proceso se repite para distintas posiciones iniciales para obtener el porcentaje de altura que nos llega a toda nuestra zona de estudio.

En total se han estudiado 30 ortogonales para cada período y dirección individual, que al agruparlas por direcciones nos dan - para cada período - 90 ortogonales correspondientes a ondas incidentes del W y 120 ortogonales del NW. Esto nos da una densidad de 1 dato de porcentaje H/H_0 cada 4-6 Km de costa, suficiente para poder trazar mapas de porcentajes de altura que se conserva al refractarse trenes de ondas de diferentes direcciones y períodos.

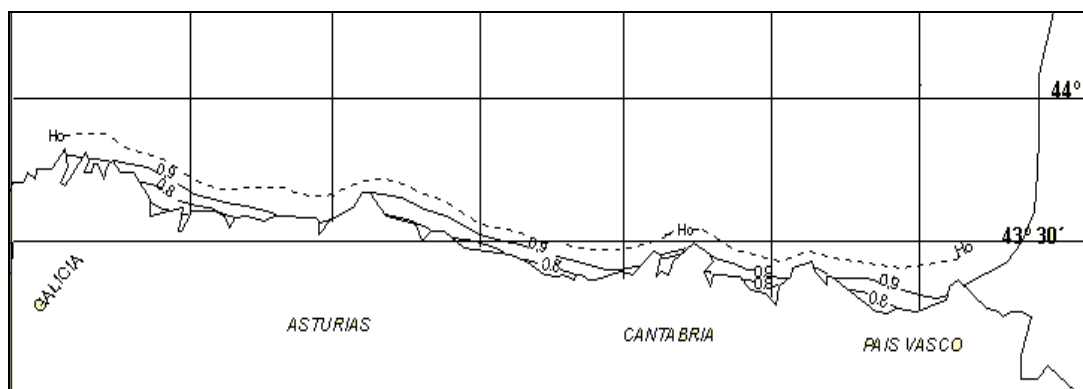


Fig. 2. Refracción de una onda corta del NW

Los resultados obtenidos se resumen en los mapas siguientes (Figs. 2 a 7), donde H_0 nos indica la altura de onda que llega al límite de las aguas someras (Obviamente, esta altura no es igual en todos los puntos de dicha línea, ya que las ondas se amortiguan por propagación debido a la dispersión angular y radial). Dicha línea (en línea discontinua) coincide con el límite de las aguas someras. Las demás líneas nos indican el porcentaje de altura que se conserva por refracción al pasar de aguas profundas a aguas someras y llegar hasta la costa.

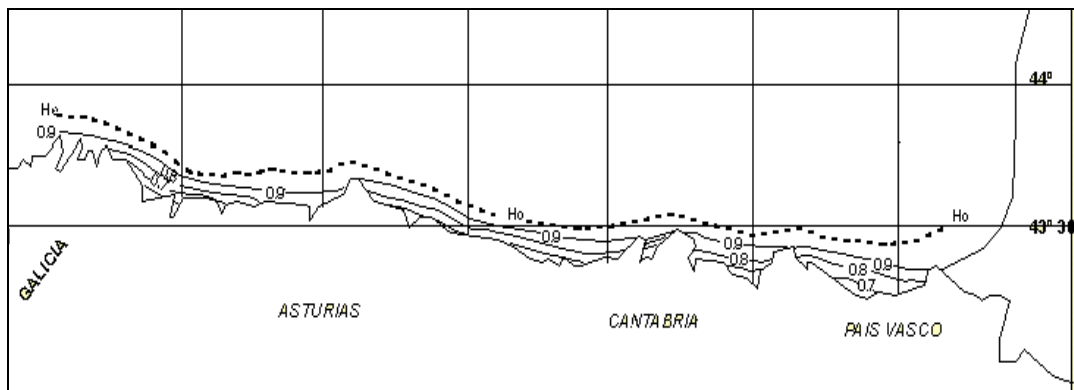


Fig. 3. Refracción de una onda regular del NW

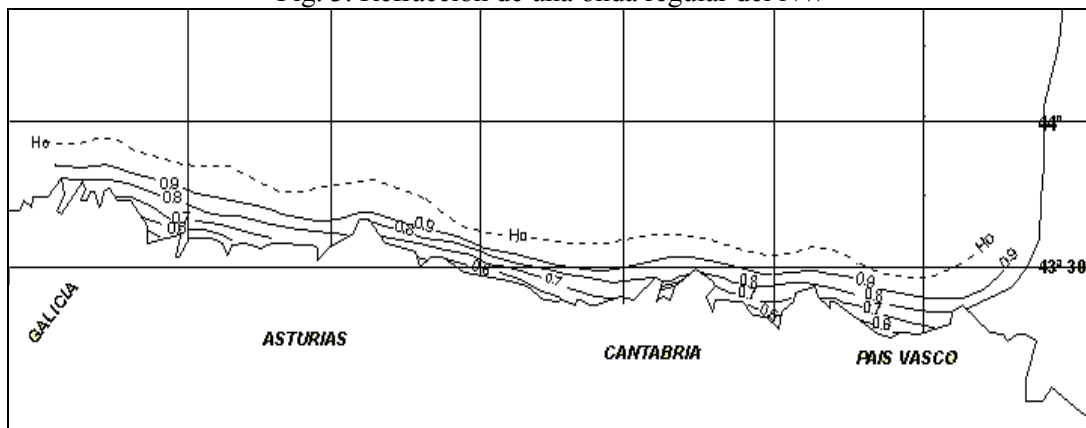


Fig. 4. Refracción de una onda larga del NW

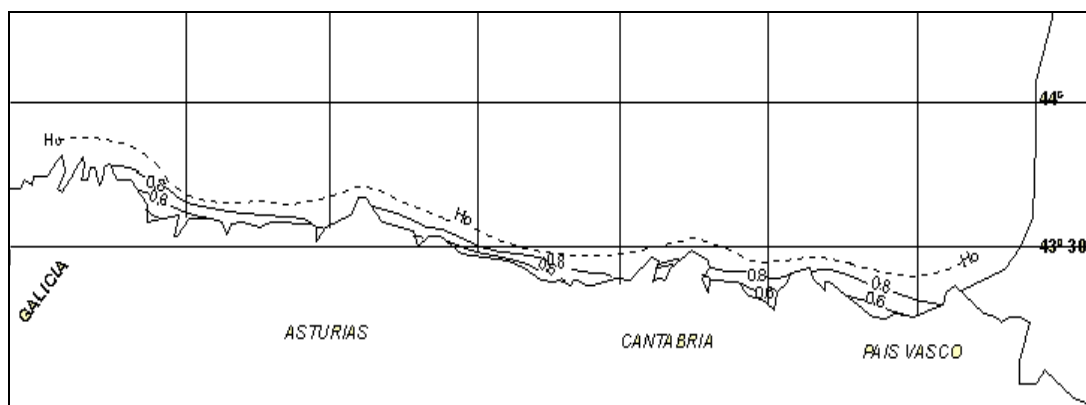


Fig. 5. Refracción de una onda corta del W

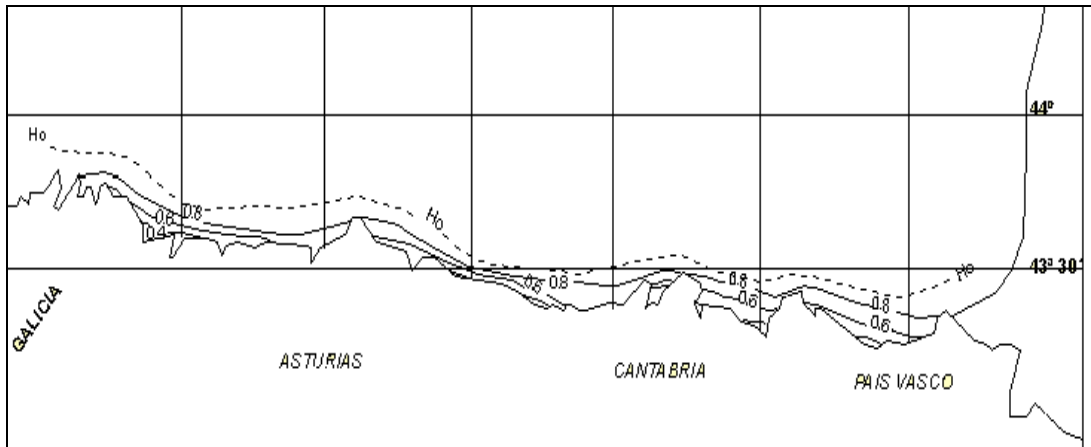


Fig. 6. Refracción de una onda regular del W

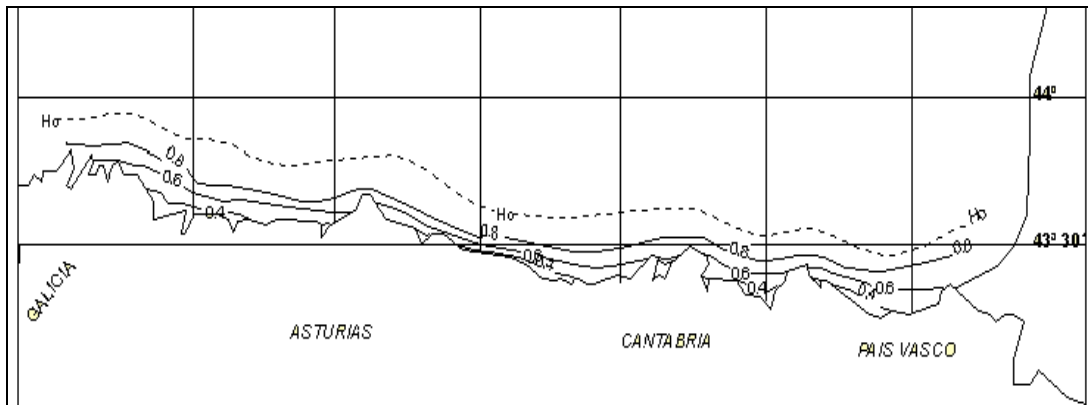


Fig. 7. Refracción de una onda larga del W

Como puede verse, se amortigua más el oleaje cuanto mayor sea el período y más hacia el W la dirección. Nótese que las líneas de amortiguamiento van de 0,1 (10%) en 0,1 en el caso de oleaje del NW y de 0,2 en 0,2 en el caso de oleaje del W. Así pues, para un oleaje del W de período largo puede llegar a la costa sólo el 40% del oleaje en aguas profundas, mientras que si es del NW de período corto llega un 80%. Esto es importante a la hora de analizar y predecir el oleaje en las aguas costeras del Cantábrico.

En la práctica, los análisis y las predicciones marítimas costeras para el Cantábrico se hacen para extensas zonas, como son las Comunidades Autónomas de nuestra responsabilidad (Asturias, Cantabria y País Vasco). Así, aunque hemos visto que el efecto de la refracción es distinto para ciertas zonas, dependiendo de la batimetría y de los accidentes geográficos (cabos, bahías, orientación de la costa, etc.), parece más útil utilizar valores medios para calcular el oleaje en aguas someras. Del resultado de las 120 ortogonales estudiadas, podemos sacar una relación entre la altura del oleaje (generalmente de mar de fondo o mar compuesta de mar de fondo y mar de viento) en aguas profundas en nuestra zona costera y la altura del oleaje en aguas someras cerca de la costa (aproximadamente entre 0,5 y 1 millas náuticas), para un oleaje entrante del 4º cuadrante (el oleaje del 1º cuadrante suele ser de mar de viento, importando más la fuerza del viento, la

persistencia y el recorrido del mismo). Conviene especificar que un oleaje del norte (perpendicular a nuestras costas) no se ve afectado apenas por la refracción. Asimismo, las componentes angulares de 270° o menos no penetran en nuestra costa.

Podemos resumir los resultados del estudio en la tabla adjunta, obtenida de la siguiente relación entre alturas, dirección del oleaje α y el período T, para un oleaje incidente entre los 280° y 340°:

$$H = 3 H_0 [\cos \alpha / T]^{1/2}$$

Siendo H la altura en aguas someras y H_0 en aguas profundas. La tabla nos da la relación H/ H_0 de altura del oleaje que se conserva:

Tabla 2. Porcentaje de conservación del oleaje por refracción

	280°	300°	320°	340°
7 seg	0,47	0,80	0,99	1
10 seg	0,40	0,67	0,83	0,92
13 seg	0,35	0,59	0,73	0,81
16 seg	0,31	0,53	0,66	0,73

Viendo que, cuanto más del oeste y de mayor período sea el oleaje, más se amortigua.

Para finalizar, en la gráfica siguiente, vemos la diferencia entre el oleaje medido en aguas profundas (boya de Vizcaya, a 600 m de profundidad) y en aguas costeras (boya de Bilbao, a 50 m de profundidad). La diferencia de alturas se debe a la refracción del oleaje. Véase la similitud entre ambas curvas, variando únicamente la altura (la curva de Vizcaya es más regular, ya que da los datos cada 3 horas mientras que Bilbao los da cada hora). Durante los primeros días se observa el efecto de la refracción sobre una mar de fondo del WNW entrante en la costa vasca, amortiguándose el oleaje hasta quedar, aproximadamente, en un 60-70% de su valor en aguas profundas. Después, el oleaje disminuye y vuelve a aumentar debido, en primer lugar a la acción del viento que genera una mar de viento gruesa del WNW (en este caso las dos boyas dan oleajes similares) y posteriormente una entrada de mar de fondo (aunque la boya de Bilbao deja de dar datos, se observa la diferencia entre aguas profundas y costeras). Las alturas significativas están en línea continua, siendo la de arriba la de la boya de Vizcaya. La dirección esta en línea discontinua en torno a los 300°. El viento y el período están en línea discontinua debajo de la gráfica, correspondiendo un período entre los 10 y 15 segundos.

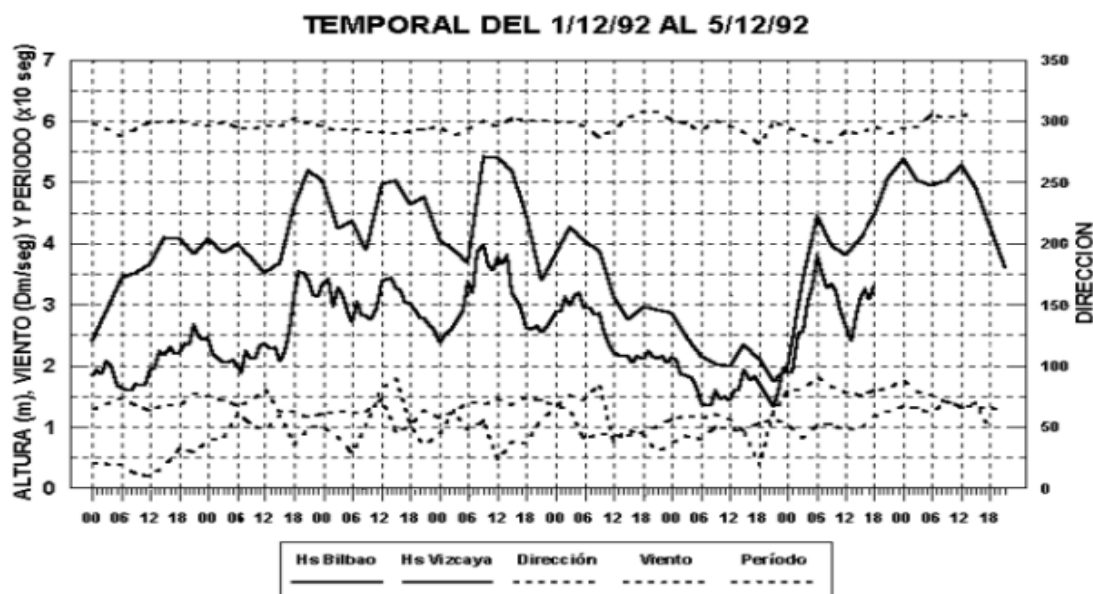


Fig. 8. Oleaje en las boyas de Vizcaya y Bilbao

5. REFERENCIAS

- ARTECHE GARCIA J.L.; ORTIZ BERENGUER F.J. y ARASTI BARCA E.(1990). Aproximación al estudio de la refracción de oleaje en una plataforma costera. Resolución numérica del método de las ortogonales. En: *III Simposio Nacional de predicción*, INM-Madrid
- CERC (Coastal Engineering Research Center). (1977, 1984). *Shore Protection Manual*. Waterways Experiment Station, US Army Corps of Engineers.
- CONDE ALDEMIRA, J.J. (1977). *Cálculo numérico de la refracción de una onda monocromática y de un espectro de oleaje*. Laboratorio de Puertos "Ramón Iribarren", CEEOP, Madrid.
- LOSADA M.A. y TEJERIA J.L. (1978). *Refracción, Difracción, Rotura, Run-Up y Overtopping*. Curso de Ingeniería Portuaria. Tomo V. Departamento de Ingeniería Oceanográfica y Portuaria. E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad de Cantabria, Santander.
- OMM. *Guía para el análisis y pronóstico de olas*. Nº 702.
- ORTIZ BERENGUER, F.J. (2004). *Estudio de fenómenos adversos en el Cantábrico: Estado de la mar*. Nota técnica del Equipo Técnico del GPV del CMT en Cantabria y Asturias (INM)