

# La seguridad en la defensa de la costa

ANTONIO LECHUGA ALVARO (\*)

**RESUMEN** En este trabajo se aborda el esquema integrado de un sistema de defensa de la costa. Se entiende integrado en el sentido de que se trata de definir unos pocos parámetros que representen en un momento dado el riesgo de determinado sistema de defensa. Uno de estos parámetros es la cota. El segundo aspecto a considerar es la proyección al futuro de este índice de riesgo. Para ello analizamos la consecuencia más visible del llamado cambio climático como sería la subida del nivel del mar y su efecto en la seguridad. Previamente se identifican los principales efectos de esta subida.

## SAFETY OF COASTAL DEFENSE SYSTEM

**ABSTRACT** *An integrated scheme of the safety of coastal defense system, is presented. We call it integrated in the sense that we are attempting to define a few parameters to present the safety of coastal system in a specific moment. The sea level is one of these parameters. A second aspect to consider is the value in the future of this safety index. It is thought that sea level rise is the main effect of the so called climatic change so we will study the relationship between the sea level rise and safety. First of all we will try to identify the most important aspects of this rise.*

**Palabras clave:** Playas; Seguridad; Inundación; Riesgos.

## 1. INTRODUCCIÓN

La seguridad en la defensa de la costa se puede abordar metodológicamente considerando cuales son los riesgos actuales de la zona de costa y cuales son los riesgos previsibles futuros, teniendo en cuenta, por ejemplo, la subida del nivel del mar. Este ha sido el camino emprendido por los investigadores y técnicos de los países más avanzados y es el que nosotros usaremos aquí.

En primer lugar, por tanto veremos los riesgos debidos al oleaje y a continuación describiremos brevemente los principales efectos de la subida del nivel del mar y su repercusión en la seguridad de las obras marítimas y costeras.

En el estudio de los riesgos asociados al oleaje en las zonas costeras hay que tener en cuenta los efectos principales que las ondas de superficie provocados por el viento producen en el litoral. Estos efectos son de tres tipos:

- 1) Efecto mecánico de las olas, antes y después de su rotura en los fondos marinos, los acantilados costeros, las playas y las estructuras marítimas.
- 2) Elevación del nivel de mar (set-up) provocada por estas ondas de superficie y que puede tener como consecuencia la inundación de áreas costeras, emergidas cuando el mar está en su nivel de reposo.
- 3) Excursión de las olas rotas en la superficie formada por la tierra firme (run-up en la terminología anglosajona) y que superponiéndose al efecto anterior hacen que el agua de mar inunde las zonas costeras de baja altura.

En cuanto al efecto de la subida del nivel del mar sobre los riesgos, una enumeración de los más importantes sería la siguiente:

- 1) Inundación y el consiguiente paso más o menos gradual de tierra firme a zonas húmedas y de zonas húmedas a aguas profundas. Esto puede ser importante en algunos países y localizaciones.
- 2) Aumento de la erosión costera.
- 3) Incremento de la salinidad de los estuarios con las repercusiones ecológicas que esto llevaría consigo.
- 4) Alteraciones de la carrera de las mareas y su circulación.
- 5) Cambios en los depósitos sedimentarios de las desembocaduras de los ríos.
- 6) Incremento de la altura del oleaje que se combinará con el aumento de la erosión costera.
- 7) Disminución de la cantidad de luz de los fondos marinos con sus repercusiones en el biotopo.

Este catálogo de efectos es general y en algunos casos los riesgos en nuestras costas debido a esto es mínimo aunque probablemente no despreciable.

La caracterización de un oleaje en un determinado temporal, es decir la distribución de las alturas y periodos del mismo es un estudio complejo que se efectúa mediante la descripción de la serie temporal obtenida a través de registros con la herramienta poderosa del análisis de Fourier llamado en nuestro caso análisis espectral. Por otro lado la distribución en un periodo de tiempo determinado de las magnitudes más representativas del oleaje (en general altura y periodo), se efectúa con las herramientas tradicionales y características del análisis estadístico, con funciones de distribución específicas al caso considerado.

(\*) Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Jefe del Area de Costas del Centro de Estudio de Puertos y Costas del CEDEX. Ministerio de Fomento.

Antes de entrar en los desarrollos del oleaje como fenómeno real y con todas sus complejidades es conveniente dar un repaso a la teoría de ondas que fue y es la base de partida del estudio del oleaje de viento. No consideraremos aquí por salirse fuera del contexto fenómenos ligados al oleaje pero con periodos considerablemente mayores al mismo, que aunque importantes en sí son menos notables desde el punto de vista de los riesgos. Nos referimos, por ejemplo, a los grupos de olas, ondas largas de diversa naturaleza, ondas de orilla, etc. Tampoco se considerará el estudio del análisis espectral que aunque importante para algunos conceptos fundamentales como periodo de pico, función de densidad espectral y sus momentos, etc., no es relevante para los riesgos. De pasada se citarán otros aspectos no ligados al oleaje pero sí con la elevación del nivel provocada por las bajas de presión y que contribuyen a hacer más dañinos sus efectos en determinadas condiciones.

El plan de este trabajo consistirá en primer lugar en un repaso a la teoría de ondas para pasar a continuación a la caracterización estadísticas del oleaje en condiciones medias y en condiciones extremas. Con posterioridad se estudiará el efecto del oleaje en las zonas costeras con algunos ejemplos, así como la defensa frente a su acción. Finalmente se extraerán algunas conclusiones.

## 2. TEORÍA DE ONDAS

Las ondas de superficie han sido observadas desde la más remota antigüedad. Sin embargo su estudio sistemático se inicia hace algo más de 300 años. En efecto Isaac Newton en su famosa obra Principia Mathematica (1687) establece las primeras características de las ondas de superficie considerando su velocidad y su longitud de onda de una manera acertada. Con posterioridad muchos matemáticos incidieron en el estudio de las ondas con los primeros pasos de la Hidráulica como ciencia: Bernouilli y Euler entre otros.

Hace 150 años, exactamente en 1847 Stokes estableció y resolvió las ecuaciones hidrodinámicas de las ondas de superficie creando un cuerpo doctrina que con algunas variaciones ha llegado hasta nosotros.

Esquemáticamente la teoría de Stokes de las ondas de superficie se desarrolla como sigue:

- Las ecuaciones hidrodinámicas planteadas de las ondas de superficie fueron resueltas primeramente por Stokes en 1847 tomando unos ejes móviles de referencia que se mueven con la celeridad "c" de la onda y definiendo unas variables complejas,  $Z = X + Yi$  y  $W = \Phi + i\Psi$  en función de las coordenadas cartesianas y del potencial de velocidades respectivamente.

Primeramente Stokes utilizó la velocidad potencial en términos de serie de Fourier de la coordenada compleja, Z en la forma:

$$\frac{W}{c} = A_0 Z + B_0 \sum (A_j e^{ijz} + B_j e^{-ijz})$$

En donde las constantes son deducidas de las ecuaciones de contorno.

Posteriormente Stokes se dio cuenta de que el problema se reducía considerablemente si se tomaba Z como serie de Fourier de W:

$$Z = A_0 \frac{W}{C} = B_0 \sum (A_j e^{ijw/c} + B_j e^{-ijw/c})$$

aplicándose, lógicamente en este caso también las apropiadas condiciones de contorno para obtener los coeficientes.

La solución obtenida, para la onda de Stokes hasta el primer orden es la siguiente, tanto para el perfil como para el potencial de velocidad

$$\eta(x - ct) = A \cos k(x - ct)$$

$$c = \left( \frac{g}{k} thkh \right)^{1/2}$$

$$\varphi = \frac{A \cdot C}{shkh} \left[ chkh \left( 1 + \frac{z}{h} \right) \text{sen} k(x - ct) \right]$$

En donde c es la celeridad de la onda, k el número de onda y h la profundidad (véase figura 1).

El valor de la celeridad lleva implícita la relación de dispersión lineal que se puede poner en la forma equivalente:

$$\frac{w^2}{g} = k \cdot thkh$$

La solución de segundo orden se escribe:

$$\eta(x - ct) = A \cos k(x - ct) - \frac{1}{4} k \frac{A^2}{sh^2 kh} \cdot \left[ \left( thkh - \left( \frac{2ch^3 kh + chkh}{shkh} \right) \right) \cos 2k(x - ct) \right] c = \left( \frac{g}{k} thkh \right)^{1/2}$$

$$\varphi = \frac{A \cdot c}{shkh} \left[ ch \left( kh \left( 1 + \frac{z}{h} \right) \right) \text{sen} k(x - ct) \right] + \frac{3}{8} ckA^2 \cdot \frac{ch2kh \left( 1 + \frac{z}{h} \right)}{sh^4 kh} \text{sen} 2k(x - ct)$$

Como vemos la solución de segundo orden tiene la misma relación de dispersión que la solución lineal.

En todas las distintas soluciones el parámetro considerado en el desarrollo es precisamente la amplitud del primer armónico.

Según los desarrollos de la onda de 3<sup>er</sup> orden la relación de dispersión no lineal depende de la amplitud al cuadrado dejando por tanto, de ser independiente de la altura de la onda, lo cual, es fácil de adivinar, tiene importantes consecuencias de tipo práctico.

## 3. APROXIMACIÓN A UN SISTEMA DE DEFENSA DE LA COSTA

En general un sistema de protección de la costa es una combinación de diferentes elementos cuyo objetivo último es impedir el deterioro o la inundación de determinadas zonas litorales expuestas. Puede constar de playas hipercompletas, espigones, diques, escolleras, etc.

Dado un particular sistema de protección de la costa su seguridad viene determinada por la probabilidad conjunta de que se presente un determinado oleaje, con su correspondiente sobre elevación y expansión de la ola rota hasta una determinada altura, en unas particulares condiciones de marea y por lo tanto de elevación del nivel del mar y en

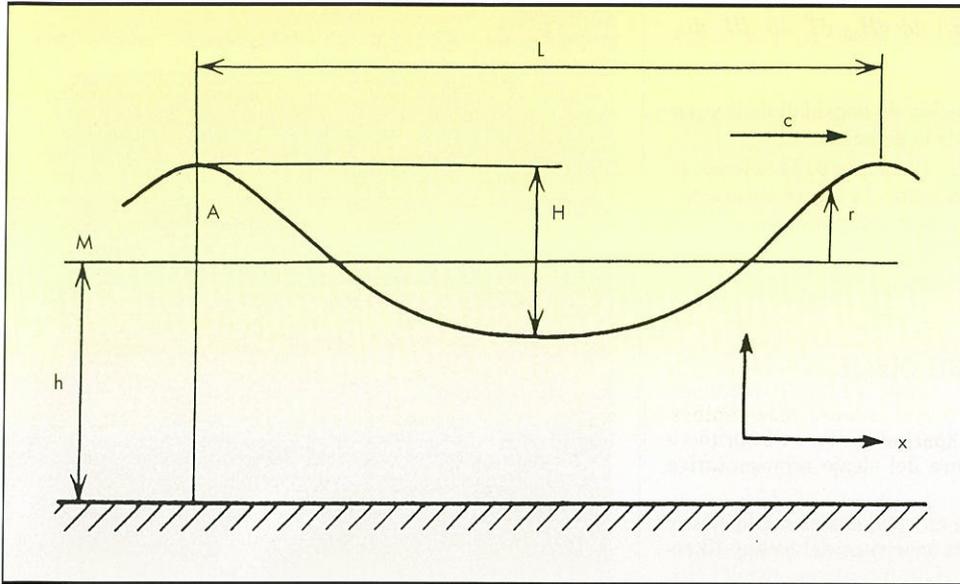


FIGURA 1. Principales características de la onda de superficie propagándose sobre una profundidad \$h\$.

unas determinadas condiciones de viento local y sobre elevación por presión.

La formulación matemática aproximada podría ser como sigue:

$$H_s = f_1(d, H_{50}, T, \alpha, U_v, \alpha_v)$$

Siendo \$H\_s\$ la altura significativa del oleaje en la defensa correspondiente, \$d\$ la profundidad en este punto, \$T\$ el periodo medio, \$\alpha\$ el ángulo del oleaje con la línea de costa, \$U\_v\$ velocidad del viento local y \$\alpha\_v\$ ángulo del viento con la línea de costa.

La máxima excursión de la ola rota medida en vertical, se puede considerar también en función de los mismos parámetros.

$$R = f_2(d, H_{50}, T, \alpha, U_v, \alpha_v)$$

ó aplicando el criterio del Battjes

$$R = \frac{1}{n} T \sqrt{g H_s}$$

Siendo \$\frac{1}{n}\$ el talud de la defensa en cuestión.

Podríamos definir un parámetro \$Z\$ que nos indicara el grado de seguridad de la obra y que simplifcadamente será estimado como

$$Z = H - d - R$$

Siendo \$H\$ la altura característica de sistema de defensa, \$d\$ la profundidad al pie y \$R\$ el run-up (excursión de la ola rota, véase figura 2).

La función de densidad conjunta de presentación de todas estas variables se puede representar como la integral múltiple en función de las probabilidades individuales de cada variable en la forma siguiente:

$$P(H_s) = \int \dots \int_{H_s=H_1} P(d, H_{50}, T, \alpha, U_v, \alpha_v) \cdot dd \cdot dH_{50} \cdot dT \cdot d\alpha \cdot dU_v \cdot d\alpha_v$$

de la misma manera la función de densidad de \$R\$,

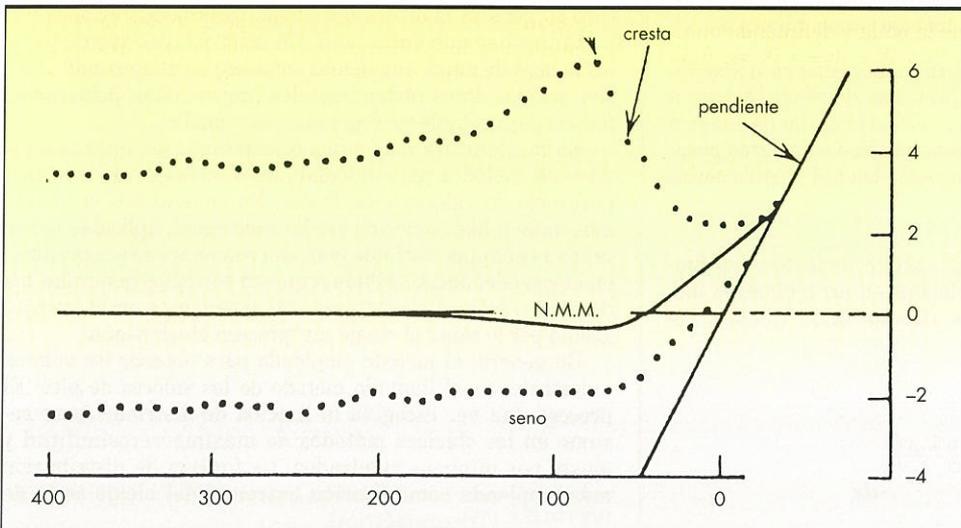


FIGURA 2. Elevación del nivel de profundidad por el oleaje después de rotura (nivel medio, movimiento de la cresta, movimiento del seno).

$$P(R) = \int \dots \int_{R_0=R_1} P(d, H_{50}T, \alpha, U_v, \alpha_v) \cdot dd \cdot dH_{50} \cdot dT \cdot d\alpha \cdot dU_v \cdot d\alpha_v$$

Asimismo se obtendría la función de densidad de Z y por lo tanto del grado de seguridad de la defensa.

Por ejemplo si se estimase que al colapso de la defensa se produce cuando se supera en un metro la altura característica de la obra, la probabilidad de este colapso sería

$$P = \int_{-\infty}^{-1} p(z) \cdot dz$$

#### 4. LA ALTURA SIGNIFICANTE DEL OLAJE. SU ESTIMACIÓN

En el proceso sintetizado en el apartado anterior la primera variable a considerar es la altura del oleaje representativa de un temporal dado.

La caracterización del oleaje en condiciones medias es el aspecto mejor conocido del clima marítimo del oleaje. El régimen medio viene expresado por la función de distribución estadística definida como el porcentaje del tiempo en que la altura de ola no supera determinado valor en el año medio. Para la obtención de la distribución estadística buscada se parten de diversas muestras de datos y de distribuciones tipo parametrizadas que mediante el oportuno ajuste intentan reproducir la población muestral. Las fuentes de datos usualmente empleadas en nuestras costas son las siguientes:

- 1) Datos visuales de oleaje. Consistente en un registro mundial de datos de oleaje obtenidos mediante buques en ruta que se van almacenando en un Centro Meteorológico Mundial de Asheville (Estados Unidos) y que en soporte magnético se pueden obtener para cada área geográfica. La información básica consiste en matrices de alturas y períodos para cada sector direccional. Por supuesto este es el principal soporte para estudios direccionales y regímenes medios.
- 2) Datos instrumentales obtenidos mediante boyas medidoras de oleaje direccional o no y que en la actualidad se procesan, clasifican analizan y guardan en las llamadas Red de Medida y Registro de Oleaje (REMRO) y Estaciones de Medida de Oleaje Direccional (EMOD). Su descripción ha sido objeto de numerosos estudios y no se incluye en el contenido de este trabajo (véase Figura 3).
- 3) Por último en determinadas circunstancias es necesario hacer uso de los modelos de previsión de oleaje en base a los datos de vientos o campos isobáricos, dando lugar a los métodos de hindcasting (usando bases de datos pasados) o métodos de forecasting (previsiones usando series idealizadas hacia el futuro).

Vamos a señalar a título meramente indicativo las funciones de distribución más empleadas en los regímenes medios, todas ellas biparamétricas, excepto la de Weibull. Estas son:

#### LOGONORMAL

$$\frac{1}{B\sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} \frac{1}{x} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\ln-A}{B} \right)^2} \cdot dx$$



FIGURA 3. Boya de medida de oleaje.

#### EXPONENCIAL

$$1 - \text{Exp}[-C(x - A)]$$

#### WEIBULL

$$1 - \text{Exp}\left(-\frac{X - A}{B}\right)^2$$

#### ASINTOTA I

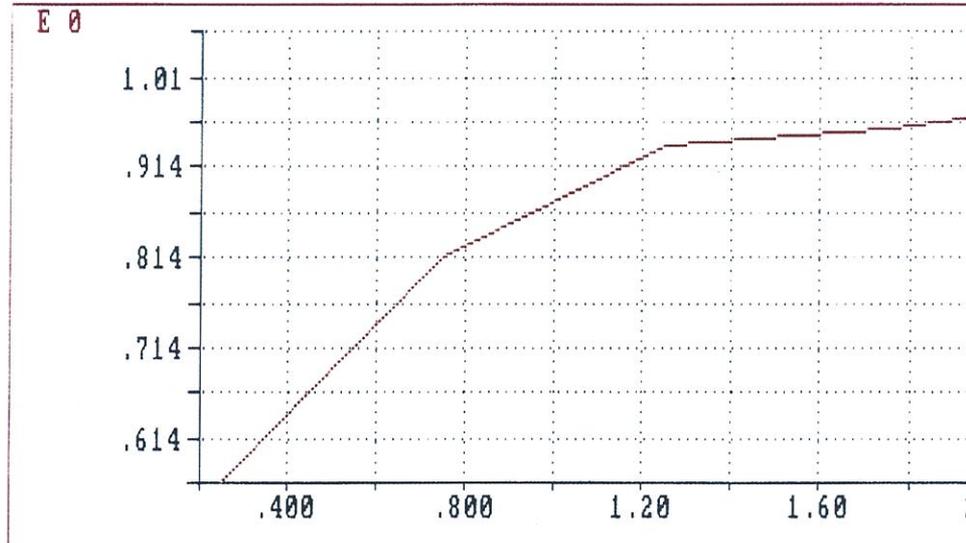
$$\text{EXP}\left[-\text{EXP}\left(-\left(\frac{X - A}{B}\right)\right)\right]$$

(véase figura 4).

El régimen extremal es la función de distribución de los valores extremos de una determinada variable, en nuestro caso en general la altura del oleaje. Dos consideraciones importantes hay que hacer aquí. En primer lugar que de todos los bancos de datos que hemos señalado en el apartado anterior solo los datos instrumentales proporcionan poblaciones fiables para establecer regímenes extremales.

En la literatura más o menos especializada aparecen los diversos métodos para calcular una función de distribución partiendo de valores muestrales. En general nos encontramos ante el bien conocido análisis extremal, aplicable por lo tanto a cualquier variable pero con connotaciones específicas en el caso del oleaje, debido a que en términos generales las diversas realizaciones no son independientes en el tiempo, siendo por lo tanto el oleaje un "proceso Markoviano".

En general el método empleado para obtener los valores muestrales es el llamado método de los valores de pico. El proceso una vez escogida la función de distribución se resume en los clásicos métodos de máxima verosimilitud y ajuste por mínimos cuadrados. La función de distribución más empleada como función extremal del oleaje es la de WEIBULL (Triparamétrica).



REGIMEN DE ALTURAS

INT. DE H. (M)	NUM. DE OBS	P	P(H)	1-P(H)
.00- .50	33.	.5638	.4362	.5638
.50- 1.00	15.	.2511	.1851	.8149
1.00- 1.50	7.	.1213	.0638	.9362
1.50- 2.00	1.	.0213	.0426	.9574
2.00- 2.50	2.	.0319	.0106	.9894

FIGURA 4. Función de distribución de no excedencia de la ola.

Un concepto todavía bastante empleado en la práctica ingenieril es la llamada "ola de cálculo" asociada a un determinado período de retorno.

Teniendo en cuenta que la función de distribución extremal proporciona la probabilidad de excedencia para cada temporal de intensidad dada en un período de tiempo determinado, el período de retorno se define como

$$T_R = \frac{1}{1 - F_R(H)}$$

Siendo  $F_R(H)$  la función de distribución extremal, la altura  $H$  correspondiente se suele denominar ola de cálculo. Técnicamente se define como la altura de ola que es superada con probabilidad,  $1/e$  en el período de tiempo considerado.

$$\lim_{T_R \rightarrow \infty} \left(1 - \frac{1}{T_R}\right)^{T_R} = \frac{1}{e}$$

En las Recomendaciones para Obras Marítimas (ROM 0.3-91) editado por Puertos del Estado aparecen los regímenes medios y extremales en cada una de las fachadas costeras españolas, remitiéndonos a esta publicación y a la Bibliografía para un tratamiento exhaustivo de estos temas.

5. LA SUBIDA DEL NIVEL DEL MAR Y LA SEGURIDAD

En el apartado de la aproximación a un sistema de defensa de la costa hemos visto que una de las variables más impor-

tantes es la profundidad,  $d$ . A efectos prácticos en la mayoría de los casos se puede considerar que la probabilidad conjunta se estima como

$$P(d, H_{50}, T, \alpha, U_v, \alpha_v) = p(d) \cdot p(H_{50}, T, \alpha, U_v, \alpha_v)$$

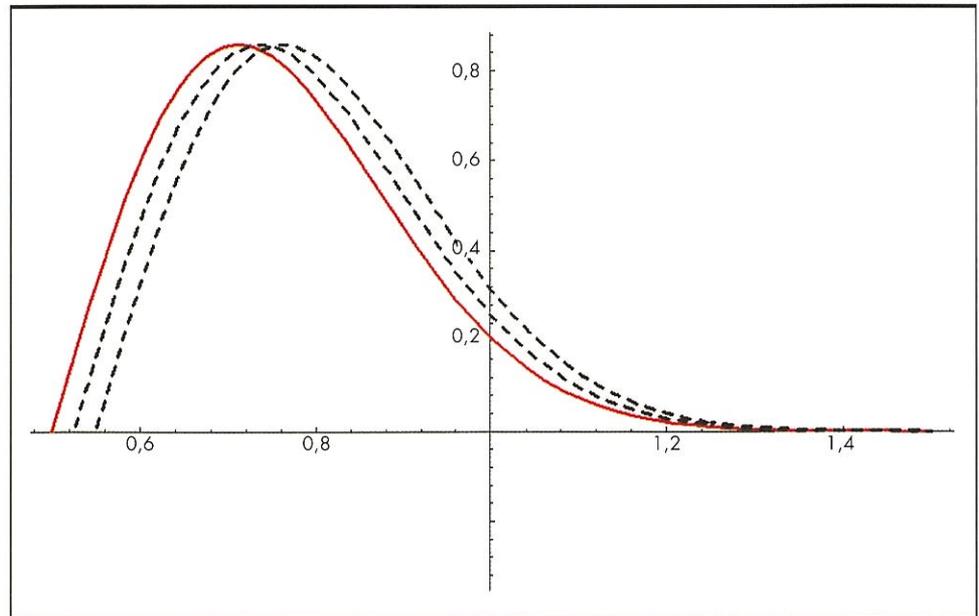
La consideración, por tanto, de la función de densidad de la profundidad al pie del sistema de defensa es esencial. Hay que tener presente que en la mayoría de estos sistemas los daños los ciframos mediante la función de distribución de la cota alcanzada ( $Z$ ).

La función de densidad  $p(d)$  tendría unas determinadas características para cada localización concreta que esencialmente dependerá de la estructura de las mareas.

El efecto de la subida del nivel del mar en esta función de densidad será simplemente un desplazamiento de dicha función en la magnitud estimada de dicha subida en el horizonte considerado. Es decir, habrá una función de densidad para el día hoy y esta misma función de densidad desplazada una cantidad dependiendo del escenario (véase figura 5).

6. APLICACIÓN A UNA PLAYA COMO SISTEMA DE DEFENSA

Las consideraciones que hemos expuesto son de carácter general, pero la aplicación más interesante es cuando el sistema de defensa consiste en una playa en donde el colapso se produce por elevación de niveles y excursión de la lámina de agua tierra adentro. En este caso la variable variación de nivel juega un papel predominante y casi único si en esta variación incluimos los términos de elevación producida por



**FIGURA 5.** Función de densidad de Weibull y efecto de la subida del nivel de mar en el periodo considerado (25 cm ó 50 cm según el escenario).

el oleaje (set-up) y recorrido del máximo alcance de la lámina (run-up).

El ejemplo tomado es la playa del Palo en el término municipal de Málaga donde la trasplaya se encuentra limitada por un Paseo Marítimo y edificaciones. Es por tanto una playa urbana (vease figura 6).

En términos de periodo de retorno es decir usando el inverso de la probabilidad de excedencia podemos decir que para un periodo de retorno de 20 años:

- La máxima elevación de nivel permanente es de aproximación 1.55 metros y la máxima elevación periódica (al influjo de las máximas crestas del oleaje) de 2.13 metros.



**FIGURA 6.** Fotografía aérea de 1995 de la playa del Palo (Málaga).

Estos mismos datos para un periodo de retorno de 50 años son:

1.67 m y 2.28 m respectivamente

Si consideramos el escenario de subida del nivel del mar (por cambio climático, etc) vemos que su valor, estimado en 4 mm/año según el IPCC (Strategies for adaptation to Sea Level Rise), tendría el efecto de un aumento considerable del riesgo (o una disminución de la seguridad) mediante el desplazamiento de las funciones de densidad respectiva en la magnitud apuntada:

10 centímetros cada 25 años

Este desplazamiento induce un cambio en la probabilidad de excedencia del orden que estamos considerando: Paso del periodo de retorno de 50 a 20 años. Esto nos sirve para calibrar justamente la importancia de este fenómeno.

## 7. CONCLUSIONES

La seguridad en la defensa de la costa se puede estimar con unas pocas variables. En la mayoría de los casos hay dos variables implicadas: el nivel del mar al pie del sistema de defensa y la altura y periodo del oleaje en ese mismo punto. Cuando el sistema de defensa es una playa la variable climática implicada es la cota de elevación que integra, como hemos visto en el ejemplo los niveles astronómicos y los correspondientes al oleaje así como la variación del nivel meteorológico. En estos casos y en otros análogos: rampas, costas bajas, defensas longitudinales de poca pendiente, etc, etc, el nivel de seguridad se estima con una cota. En el resto de situaciones el impacto mecánico de la ola puede ser importante y en principio no asimilable a una estricta variación de nivel: Es el caso, por ejemplo de las obras marítimas exteriores, diques rompeolas, etc.

Hemos empezado este artículo hablando de los efectos de la subida del nivel del mar en la seguridad de los sistemas de defensa y en el resto de los ambientes litorales. En algunas zonas geográficas los efectos inducidos pueden ser devastadores: Piénsese por ejemplo en las costas arrecifales de otras latitudes. En nuestro caso como hemos señalado en los apartados cinco y seis el efecto de una subida del nivel del mar es esencialmente una pérdida de seguridad, que dependiendo de la magnitud puede ser importante o no.

En nuestras zonas húmedas las variaciones de nivel pueden afectar de una manera sutil no solo a los ecosistemas establecidos en ellas, sino al flujo y distribución de sedimentos que a más largo plazo alterarán zonas más amplias.

## BIBLIOGRAFÍA

- BATTJES, J. A. (1971). Run-up distributions of waves breaking on slopes. *Journal of the Waterways, Harbours and Coastal Eng. Div. ASCE*, Vol. 97. Ww1, pp 91-114.
- GUZA, R. T. and E. B. THORNTON (1981). Wave set-up on a natural beach. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 86(C5), PP. 4133-4137.
- HOLMAN, R. A. (1986). Extreme value statistics for wave run-up on a natural beach. *Coastal Eng.* Vol. 9, pp. 527-544.
- HOLLAND and R. A. HOLMAN (1993). The statistical distribution of swash maxima on natural beaches. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 98. N° C6, pp. 10271-10278.
- IPCC, Strategies for Adaptation to Sea Level Rise. Response Strategic Working Group November. 1990.
- LECHUGA ALVARO, A. (1990). Ondas no lineales: relación de dispersión. Cuadernos de Investigación C 21 CEDEX Madrid.
- LECHUGA ALVARO, A. (2000). La subida del nivel del mar y la erosión de la costa. *Revista de Ingeniería Civil* n° 119 pp 55-58.
- MAI, S. (1999). Safety of coastal defense systems. In: (X 277) *Mitt. Franzius Inst.* 83 (1999) S.321-328.
- MARTÍNEZ ARANZÁBAL, J. y MARTÍN SOLDEVILLA, M. J. 1990. Descripción de las funciones de distribución más utilizadas en estudios de clima marítimo. Monografías CEDEX M-11.
- MEDINA, R.; CASTILLO, M. C., y MÉNDEZ, F. (1999). Atlas de inundación del litoral peninsular español. *Jornadas de Costas y Puertos. La Coruña, Sep. 1999.*
- ROS VICENT, JOAQUÍN (1993). El cambio climático y la subida del nivel del mar. Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas. CEDEX.
- SANCHEZ, V. LECHUGA, A. y DE LA PEÑA, J. M. (2001). Variación del nivel medio del mar. Cota de inundación de una playa. *R. Ingeniería Civil* n° 122.
- TITUS, J. G. (1986). Greenhouse effect, sea level rise, and coastal zone management. Environmental Protection Agency, Washington, DC New York, NY: *Coastal Zone Management Journal*, v. 14, n° 3.