

RIESGOS LITORALES

Coastal Hazards

Javier Benavente, Laura Del Río y F. Javier Gracia(*)

RESUMEN

A lo largo de las últimas décadas se ha producido un aumento en el impacto mediático de los riesgos costeros. Dicho interés está relacionado tanto con un posible incremento en la frecuencia de los eventos, como con el proceso de litoralización que está viviendo la población mundial. También influye en este interés la multiplicidad de las fuentes de riesgo en medios litorales. Por un lado, están los riesgos geológicos característicos de áreas continentales (volcanismo, sismicidad, inundaciones de origen fluvial, etc.), y por otro, los riesgos exclusivos de ambientes costeros controlados por los procesos de origen marino (olas, corrientes, mareas y oscilaciones del nivel del mar de carácter eustático). Esta variedad de agentes revela la complejidad de procesos, y por tanto de los posibles riesgos asociados a ellos, en relación con la dinámica geológica de los medios litorales. Entre todos ellos, la actuación de fenómenos extremos marinos como temporales o huracanes constituye la principal fuente de riesgo a corto plazo en áreas litorales, especialmente cuando se trata de costas bajas con un alto grado de ocupación antrópica. En el presente trabajo nos ocuparemos de los riesgos que pueden darse en zonas litorales, especialmente de los riesgos ligados a procesos exógenos.

ABSTRACT

During the last decades a raise in the impact of coastal hazards in the media has been experienced. This interest is related to a possible increase in the frequency of coastal extreme events, as well as to the rising population in littoral areas all around the world. Moreover, another influencing factor is the high diversity of sources for coastal hazards. On one hand, there are geological hazards which are characteristic of the continental areas (vulcanism, seismicity, river floods, etc.); on the other hand, there are hazards of marine origin which only affect coastal environments. These are controlled by marine agents such as waves, currents, tides and eustatic sea level changes. This wide range of possible events shows the complexity of processes linked to the geological dynamics of littoral areas, and hence the complexity of the associated hazards. Among all these possible sources of coastal hazard, the impact of extreme marine events is the most relevant and widespread in a short term basis, especially in low-lying areas with high levels of human development. This work presents a summary of the main coastal hazards, mainly focused in those linked to exogenous processes.

Palabras Clave: riesgos costeros, temporales marítimos, erosión costera, sedimentación costera.

Keywords: coastal hazards, marine storms, coastal erosion, coastal sedimentation.

INTRODUCCIÓN

Las distintas definiciones de riesgo natural consideran que un proceso geológico cualquiera no constituye un riesgo mientras la actividad humana no interfiera o se ve amenazada por él (Olcina y Ayala, 2002); aún en este último caso, un mismo proceso geológico puede constituir un riesgo para una determinada actividad, y no serlo para otro tipo de desarrollo. Hay que contar, por tanto, con el tipo de uso que el ser humano hace del medio y con el balance económico resultante de la interferencia entre dicho uso y la dinámica geológica natural. En el caso de las áreas litorales estas variables de carácter socioeconómico que definirían un riesgo natural, cobran un especial protagonismo.

En el conjunto del planeta se estima que el 60% de la población vive a menos de 100 km del mar, y las previsiones de futuro manifiestan una intensificación en el crecimiento de dicha población, dado el proceso de litoralización que actualmente se está produciendo. Según las Naciones Unidas (Barragán, 2004), tres cuartas partes de la población mundial podría habitar en la franja costera hacia el 2020 (unos 4.500 millones de habitantes). Junto con esta población se asientan actividades que suponen, con frecuencia, notables modificaciones del entorno natural. Esta concentración de la población y de actividades en las áreas litorales está produciendo un incremento en la incidencia de los riesgos costeros. En el caso de España, su costa presenta un total de 6.637 km, de los cuales el 57,7% está formado por

(*) Dpto. Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales, Universidad de Cádiz, Av. República Saharaui s/n, 11510. Puerto Real, Cádiz, España. javier.benavente@uca.es; laura.delrio@uca.es; javier.gracia@uca.es

costas acantiladas rocosas, el 30,1% por costas acumulativas arenosas, el 1,1% por costas acumulativas con sedimentos muy finos, el 0,9% por estuarios y el 10,2% por costas artificiales. Por otro lado, más del 35% de la población del país vive a menos de 5 km de la línea de costa (Díaz de Terán y Cendrero, 1992).

A toda esta problemática se superponen los posibles escenarios relacionados con el cambio climático actual y futuro. Destacan en este sentido dos consecuencias que aumentarían el riesgo asociado a los temporales marítimos: el incremento del número de tormentas o de la energía asociada a ellas (Lozano *et al.*, 2004), y el ascenso del nivel del mar, que provocaría un aumento en las probabilidades de inundación y en los daños producidos por ellas (Nicholls, 2002).

Por otro lado, la zona costera constituye un ambiente altamente dinámico y cambiante donde los procesos se desarrollan a una elevada velocidad, fundamentalmente en el caso de costas bajas de tipo arenoso. Dentro de esta elevada variabilidad, los eventos de tipo catastrófico provocan los cambios más dramáticos y de mayor entidad. La fuerza destructiva de los mismos, así como su capacidad para alterar la morfología costera, ha sido conocida desde que se comenzó a habitar el litoral; sin embargo, la capacidad de comprender los procesos que controlan dichos efectos solamente ha avanzado de forma significativa en las últimas décadas. Resulta por tanto fundamental conocer su evolución y los agentes que actúan sobre su dinámica, de cara a poder predecir con cierta garantía las tendencias de la costa (Dabrio y Zazo, 1987).

Para ello, en primer lugar conviene concretar la zona de actuación de esta dinámica. Podría definirse la costa como el espacio en el que interaccionan los ambientes terrestres y marinos (o lacustres). Presenta una anchura variable, sujeta a sucesivos cambios a lo largo del tiempo. Por este motivo, su delimitación es muy difícil y los límites consisten muchas veces en cambios graduales entre unos ambientes y otros; los criterios de acotación del espacio litoral pueden ser físicos, biológicos o culturales, y no tienen por qué coincidir (Carter, 1991). Los procesos principales que actúan sobre las costas y que influyen en su modelado son las olas, corrientes y mareas, dando lugar a erosión o acumulación de sedimentos. Los cambios relativos del nivel del mar modifican el área donde actúan estos agentes y multiplican sus efectos. La acción antrópica se suma a estos agentes, interfiriendo en el sistema natural, a menudo negativamente, desestabilizando equilibrios y acelerando los procesos.

Las fuentes de riesgo en medios litorales son múltiples. Por un lado, las zonas emergidas pueden verse sometidas a todos los tipos de riesgos geológicos característicos de áreas continentales (volcanismo, sismicidad, inundaciones de origen fluvial, etc.). A ellos habría que añadir los citados agentes marinos, que consisten en ondulaciones de la superficie del mar de diversa frecuencia y longitud de onda: olas generadas por el viento, mareas, grandes

olas catastróficas como los tsunamis y las olas de temporal, o bien lentas oscilaciones del nivel del mar de carácter eustático. Toda esta gran variabilidad de fenómenos muestra la complejidad de procesos, y por tanto de posibles riesgos asociados a ellos, en relación con la dinámica geológica de los medios litorales.

El estudio de los riesgos litorales se organiza de acuerdo a la génesis de los procesos, diferenciando entre riesgos litorales generados por procesos endógenos y riesgos ligados a procesos exógenos. Entre los primeros destacan los *tsunamis*, grandes olas destructivas producidas por movimientos bruscos del lecho oceánico, la mayoría de las veces asociados a sismos y erupciones volcánicas (para más información sobre este tema ver el número 13.1 de esta misma revista; VV.AA., 2005). En el segundo grupo se incluyen el oleaje generado por el viento (con sus procesos erosivos y acumulativos asociados) y las mareas. En el presente trabajo nos ocuparemos exclusivamente de los riesgos de carácter exógeno, objetivo del presente monográfico.

Los procesos geológicos de origen exógeno característicos de medios litorales son muy variados y muestran una gran complejidad. Los agentes morfogenéticos principales de origen marino son el oleaje (y las corrientes litorales asociadas a él) y las mareas. El primero de ellos, entendido como una perturbación de la superficie del mar provocada por la acción del viento, presenta una gran variabilidad. Existen oleajes de gran magnitud y baja frecuencia, comúnmente relacionados con determinados fenómenos meteorológicos: ciclones, temporales, tormentas, etc. Su efecto sobre la costa y sobre la actividad humana asentada en ella es muchas veces dramático, a pesar de ser un fenómeno poco habitual. Por otro lado, existe un oleaje de baja magnitud y alta frecuencia, relacionado con situaciones meteorológicas más benignas y más habituales, cuyo efecto sobre la costa puede ser también muy importante, ya que el tiempo de actuación del proceso es mucho mayor. Se trata, por tanto, de dos variantes de un mismo fenómeno, cuyos resultados suelen ser muy diferentes. Los temporales pueden ocasionar erosión y destrucción generalizada de la costa; el oleaje y la dinámica asociada a él puede provocar una erosión más lenta (aunque igualmente perniciosa a medio y largo plazo), o bien sedimentación en ciertas circunstancias, según un patrón complejo.

Las mareas, como oscilaciones del nivel del mar asociadas a fenómenos astronómicos (conjunción de los efectos gravitatorios de la Luna y el Sol sobre las masas de agua oceánica), presentan en general una menor energía. No obstante, desde los años 70 se viene enfatizando el papel de las mareas en la morfodinámica de los litorales. Si el rango de marea es inferior a 2 m, se supone que las olas constituyen el proceso morfogenético costero dominante, dando lugar a playas, flechas, restingas, etc., como elementos morfológicos más característicos, como sucede en la costa mediterránea española. Sin embargo, las áreas costeras sometidas a rangos de marea de 3 m o más están dominadas por morfologías



Fig. 1. Izquierda: playa arenosa afectada fundamentalmente por los procesos erosivos y sedimentarios asociados al oleaje (playa de Caños de Meca, Cádiz). Derecha: marisma fangosa afectada fundamentalmente por los procesos sedimentarios asociados a las mareas (marismas de la Bahía de Cádiz).

mareales, como llanuras de marea, marismas, etc., como es el caso de las costas atlánticas españolas. Los sedimentos acumulados en las zonas protegidas (*lagoons*, estuarios, etc.) son de granulometría fina (limo, arcilla), debido a la menor energía. La sedimentación tiene lugar cuando el flujo de las corrientes mareales alcanza un valor mínimo; esto sucede básicamente cada vez que el nivel del mar alcanza su máximo (pleamar, con depósito en la llanura supramareal). El resultado de todo este proceso es una progresiva colmatación de todos estos cuerpos de agua semicerrados.

Por otro lado, en algunos de estos cuerpos semicerrados se pueden producir fenómenos de resonancia de la onda de marea, generando lo que se denomina “*bore*”, es decir, una pared de agua con un frente muy pronunciado, que ocupa toda la anchura del cauce produciendo un rápido ascenso del nivel de las aguas (de más de 4 m en algunos casos) y con una velocidad de propagación de hasta 30 km/h. Esto puede generar problemas de inundación en asentamientos humanos cercanos a los estuarios. Uno de los ejemplos más famosos de bores se produce en el estuario del río Amazonas y recibe el nombre de *pororoca*.

Estos dos conjuntos de procesos, oleaje y mareas, afectan a todo tipo de zonas costeras. No obstante, normalmente su efecto se deja sentir de modo más acusado en las costas bajas que en las costas acantiladas; asimismo, en lo que se refiere a los riesgos asociados, las primeras son las que presentan una mayor ocupación humana mostrando, por tanto, mayores situaciones de riesgo.

TEMPORALES MARÍTIMOS

Dentro de la elevada variabilidad que presentan las áreas costeras, los temporales constituyen los episodios que provocan los cambios más dramáticos y de mayor entidad (Ferreira, 2005). La importancia es tal que, en el caso de los sistemas isla-barrera, las tormentas se consideran uno de los principales factores que han controlado su evolución holocena, fundamentalmente tras la estabilización del nivel del

mar (Roy *et al.*, 1994). En amplias zonas los temporales son considerados los máximos responsables de la erosión costera (Fenster *et al.*, 2001). De esta forma, se les asigna un papel fundamental en la evolución a largo plazo (a escala de décadas y siglos), a pesar de que su actuación se restringe a cortos intervalos de tiempo (Morton *et al.*, 1995).

Asociados a estos cambios morfológicos y a las variaciones que provocan sobre la posición de la línea de costa, los temporales generan un fuerte impacto socioeconómico. En términos medioambientales y económicos, los temporales marítimos se encuentran entre los procesos generadores de riesgo más importantes (Stone *et al.*, 2004). Si bien la intensidad del viento o de otros agentes no es tan elevada como por ejemplo en los tornados, su escala espacial y temporal de actuación es mucho mayor.

Un temporal nace del requerimiento atmosférico de equilibrar presiones entre masas de aire; el aire fluye de las altas a las bajas presiones, aunque según una trayectoria espiral, debido a la componente geostrofica del movimiento. Existen dos tipos básicos de temporales:

- *Temporales de latitudes altas* (30°-60°). Son más o menos estacionarios, lo que hace que se desplacen lentamente. Esto permite predecir de una manera precisa las zonas costeras sobre las que van a actuar. Son temporales que suelen formarse con intervalos de entre 3 y 4 días. Su intensidad no es tan grande como la de los de latitudes bajas pero producen una prolongada sobreelevación del nivel del mar en la costa, que puede abarcar varios días.
- *Temporales de latitudes bajas* (0-30°), centrados en la zona de los trópicos, llamados ciclones tropicales en el área del Pacífico, tifones en Asia y huracanes en el Caribe. Son sistemas muy violentos de bajas presiones que se originan por flujos térmicos convectivos. Se forman sobre la superficie del océano, debido al intercambio de calor con la atmósfera, en el cinturón situado a ambos lados del ecuador. Se mueven siguiendo trayectorias muy difíciles de predecir pero a través de zonas bien definidas del océano donde la



Fig. 2: Aspecto de una playa en situación de buen tiempo (izq.) y durante un temporal (dcha.). La sobreelevación del nivel del mar asociada al temporal favorece una mayor penetración del oleaje sobre la playa.

temperatura de la superficie marina es elevada (> 27°C). Pierden fuerza rápidamente sobre las masas continentales o sobre zonas donde el agua superficial presenta una menor temperatura.

Uno de los efectos más significativos de un temporal en la zona litoral es el ascenso del nivel del mar. De hecho, la inundación costera se genera fundamentalmente por la acción de las tormentas, que hacen que el nivel del mar ascienda por encima del nivel normal de las mareas (Fig. 2). La combinación de este proceso con el incremento de la energía del oleaje puede llevar esporádicamente a una sobreelevación extrema, produciendo desbordamiento de cordones dunares y de defensas costeras, especialmente cuando las tormentas coinciden con las pleamares astronómicas vivas, causando inundación costera severa (Cheung *et al.*, 2003).

Las inundaciones costeras asociadas a temporales incluso sobrepasan, en pérdidas humanas y materiales, a los daños ocasionados por terremotos, en la mayoría de los casos en países pobres: el 60% de las muertes producidas por temporales en el siglo XX se concentran en la bahía de Bengala y mar de Andaman. En 1971, el peor temporal del siglo devastó Bangladesh, causando más de 300.000 muertos, arruinando millones de viviendas, destruyendo la mayor parte de la flota pesquera del país y dejando a la nación sumida en epidemias y en la ruina económica. El temporal del Mar del Norte de 1953 causó 1800 muertos en Holanda y 300 en Inglaterra. En este caso, las pleamares vivas equinocciales, unidas a los fuertes vientos procedentes del mar y a valores barométricos muy bajos, produjeron una sobreelevación del mar de 3 m por encima del nivel medio de las mareas más altas. En España los temporales ocupan el primer puesto en cuanto a víctimas mortales causadas por catástrofes naturales (132 en 1989, 13 en 1990 y 86 en 1991).

La elevación anómala de la superficie del mar durante un temporal se denomina sobreelevación por tormenta (*"storm surge"*) y está formada por dos componentes (Fig.3):

- *Sobre elevación por descenso barométrico:* se considera que la subida del nivel del mar por descenso de la presión atmosférica es de 1 cm

por cada milibar. De manera más precisa, esta sobreelevación puede calcularse mediante la expresión:

$$\Delta \xi = (\Delta \Pi_a) / (\rho g) \quad (1)$$

donde $\Delta \Pi_a$ es la variación de la presión atmosférica y ρ es la densidad del agua del mar.

- *Apilamiento de agua por acción del viento:* El efecto de apilamiento de agua por vientos normales a la costa se puede calcular utilizando la expresión de Bowden (1983):

$$\delta \xi / \delta x = \tau_s / g \rho h \quad (2)$$

donde δx representa el recorrido de incidencia o *"fetch"*, h representa la profundidad del nivel de base del oleaje y τ_s es la fuerza tangencial ejercida por el viento:

$$\tau_s = \rho_a C_D W^2 \quad (3)$$

en esta expresión, W es la velocidad del viento, ρ_a es la densidad del aire y C_D es una constante tabulada cuyo valor depende de la velocidad del viento.

Además existe un tercer factor concurrente durante las tormentas y es el aumento de la altura de ola. Este aumento provoca una elevación del nivel del mar en la zona de traslación de la ola (*"wave set-up"*), el cual va acompañado de un incremento en el recorrido de la ola (*"wave run-up"*), y en conjunto se puede agrupar en el término:

- *Sobre elevación por acción del oleaje:* El incremento de altura de agua por acción del oleaje de temporal se puede expresar como (Holman, 1986):

$$R = 0.36 g^{0.5} H_0^{0.5} T \tan \beta \quad (4)$$

donde H_0 y T representan la altura de ola en aguas profundas y el periodo del oleaje, respectivamente, y $\tan \beta$ es la pendiente media de la playa. Esta expresión incluye tanto los fenómenos de *set-up* como el de *run-up*.

Finalmente, hay que tener en cuenta las fuertes lluvias que suelen acompañar a los temporales, de modo que el ascenso de los niveles de las aguas costeras inhibe el flujo de las precipitaciones del interior hacia el mar, lo que trae como resultado una

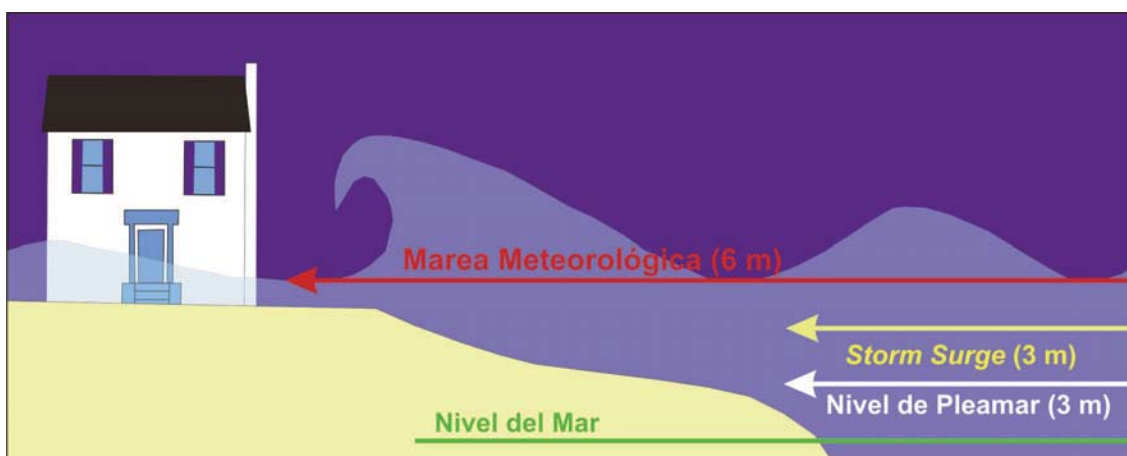


Fig. 3. Componentes de la inundación costera en una costa mareal sometida a la acción de un temporal marítimo.

inundación generalizada, fundamentalmente en zonas costeras asociadas a desembocaduras (estuarios y deltas).

Otro de los problemas asociados es el incremento de la erosión, tanto por el aumento de la energía incidente (expresado por modelos como el de Vellinga, 1982), como por la elevación en el nivel de actuación del oleaje. En este último caso destaca el modelo de Bruun (1954), que calcula el retroceso que se produce en el perfil de una playa por la sobre-elevación del nivel del mar durante dichos temporales, aunque se utiliza también para estimar el retroceso costero generado por el ascenso eustático del nivel del mar. En cualquier caso, la simplicidad del modelo de Bruun y las numerosas asunciones que implica (perfil arenoso homogéneo, ausencia de transporte longitudinal, balance de sedimento cerrado en el perfil, procesos de oleaje invariables, etc.) hacen que en la actualidad su aplicabilidad real sea objeto de debate (Cooper y Pilkey, 2004; Zhang *et al.*, 2004).

EROSIÓN Y SEDIMENTACIÓN COSTERA

La estabilidad de las costas sedimentarias está controlada por el balance sedimentario litoral, es decir, por el equilibrio existente entre el aporte de sedimentos y los procesos dinámicos que tienden a erosionarlos y transportarlos hacia otros lugares. Cuando este equilibrio se rompe, la costa cambia rápidamente, lo que hace que estos ambientes costeros sean muy sensibles a cualquier perturbación externa. Las causas de los procesos de erosión y sedimentación costera son muy variadas y complejas, ligadas tanto a procesos naturales como a actuaciones antrópicas inadecuadas.

Causas de origen natural

El principal factor que controla la posición de la línea de costa es el nivel del mar. Las subidas y bajadas relativas de dicho nivel, a escala de decenas o cientos de años, inciden sobre el equilibrio de la línea de costa. Las predicciones basadas en el actual calen-

tamiento global suponen un ascenso medio global del nivel del mar de entre 25 y 60 cm para finales de este siglo (IPCC, 2007). Entre los posibles efectos de este lento ascenso destacan la erosión costera y la inundación de tierras bajas. Por ello, es importante tener en cuenta este proceso especialmente en costas con gran densidad de población o con actividades industriales o agrícolas intensivas (como Barcelona, Valencia, Almería, Cádiz, etc.). Por último, no hay que olvidar los problemas de subsidencia local, algunos de ellos de origen antrópico.

Otra causa natural de erosión costera es la incidencia de temporales, que puntualmente pueden ocasionar pérdidas importantes de sedimento en periodos de tiempo muy breves. Una mayor frecuencia de temporales, como consecuencia de un cambio climático, acentuaría la tendencia erosiva de muchas costas. Esto se ha observado con el comportamiento de la NAO (North Atlantic Oscillation), una rotación a gran escala de las masas de aire del Atlántico Norte que genera mayores temporales en las costas españolas durante los inviernos, en los que adquiere valores negativos. Cuando presenta valores negativos la situación más meridional de las altas presiones (Anticiclón de las Azores), permite la llegada a la Península Ibérica de núcleos de bajas presiones, es decir, condiciones ciclónicas, mientras que los valores positivos sitúan las altas presiones más al Norte, desviando las trayectorias de las bajas presiones por el centro y Norte de Europa y dando lugar a condiciones anticiclónicas en la costa ibérica. Cuando la media de un año es negativa nos indicará que ha habido una predominancia de situaciones ciclónicas y por tanto habremos tenido mayor número de temporales, lo que traería asociado unas condiciones más erosivas para la costa atlántica de la Península Ibérica (Gracia *et al.*, 2006).

Por otro lado, las corrientes litorales generadas por vientos, olas y mareas, transportan sedimento de unos lugares a otros, favoreciendo la erosión o la sedimentación dependiendo de factores locales. Si las direcciones de aproximación de los temporales o de los oleajes medios de una zona varían, las co-

rientes asociadas podrían cambiar, generando una nueva disposición de las zonas de erosión y acreción, tal y como ha ocurrido a lo largo del Holoceno en algunos tramos de la costa SE peninsular (Fernández-Salas *et al.*, 2009). En las tendencias previsibles para los próximos 50 años se observa un cambio en la dirección de llegada del oleaje, fundamentalmente en la Costa Brava y archipiélagos canario y balear (MMA, 2004), lo que implicaría un cambio en la disposición de la línea de costa que tendría que ajustarse a esas nuevas condiciones, generando erosión en algunos tramos y sedimentación en otros que no coincidirían con los actuales.

Por todo ello, en los últimos años está cobrando importancia el análisis de las posibles variaciones en el clima marítimo producidas por el cambio climático. En el caso español se observa en las medidas instrumentales un aumento de la energía del oleaje que llega a la Costa Cantábrica y Gallega. Este aumento es mayor para las condiciones más energéticas del régimen medio, siendo el incremento aún mayor para los sucesos más extremos (periodos de retorno de 50 años) en la costa de Galicia. Este comportamiento produce una leve tendencia positiva en la duración de los temporales. El Golfo de Cádiz, por el contrario, presenta una tendencia decreciente en la energía del oleaje, lo que implica una tendencia a un clima marítimo más suave (MMA, 2004). Todo ello implicaría una variación de la cota de inundación así como una variación en la posición de la línea de costa.

Causas de origen antrópico

Los cursos fluviales constituyen la principal fuente de aporte de sedimentos a la costa, donde son redistribuidos por las corrientes litorales. Esto implica que cualquier alteración en los ríos o en sus cuencas receptoras generará variaciones en la cantidad de los aportes. La deforestación de cuencas y la roturación para prácticas agrícolas acelera la erosión de los suelos, cuyos productos son transportados hacia la costa. Se produce así progradación, con sedimentación en deltas, estuarios, playas, etc. No obstante, la causa no tiene por qué ser exclusivamente humana: un cambio climático y una modificación en el régimen hídrico de los ríos también tendría repercusiones en la estabilidad de los litorales. En España, la deforestación durante la ocupación romana llevó a una progradación costera generalizada, reflejada en el avance de deltas y flechas y en el relleno de estuarios y marismas. Coincidiendo con la ocupación árabe hubo un cierto periodo de estabilidad, por retención de aportes fluviales en represamientos, labores de irrigación, etc. Durante la Reconquista y hasta el siglo XIX tuvo lugar una nueva y larga fase de progradación costera, mucho más importante que la anterior, debida a roturación de tierras y prácticas agrícolas inadecuadas, que llegó a provocar problemas de aterramiento en algunos puertos (Lario *et al.*, 1995). Especialmente importante fue el aporte de sedimentos a la costa como consecuencia de las deforestaciones y roturaciones asociadas a las desa-

mortizaciones de Mendizábal y sobre todo de Maizot, en el siglo XIX (Gracia *et al.*, 2000).

En el siglo XX se produjo un cambio en la tendencia: la construcción de grandes embalses en las cuencas y las derivaciones para regadío, con las consiguientes retenciones de sedimentos, dieron lugar a un déficit sedimentario en la costa y una importante erosión de los litorales arenosos, sobre todo a partir de los años 50 y 60 (Sanjaume *et al.*, 1996). Así, esta es la principal causa del retroceso costero que se observa en los tramos litorales cercanos a la desembocadura de grandes ríos como el Guadalquivir (Anfuso *et al.*, 2007) o el Ebro (Jiménez y Sánchez-Arcilla, 1993).

Por otro lado, el mantenimiento del equilibrio de las playas está controlado por la transferencia de sedimento entre la zona submareal, la playa y las dunas, mediante mecanismos de transporte transversales a la costa. Así, durante los periodos de baja energía (o condiciones de verano) predomina un transporte hacia la playa (acreción), dando lugar a la acumulación de sedimentos en la playa seca y en las dunas. Durante las fases de alta energía (o condiciones invernales) se dan condiciones que favorecen el transporte hacia mar (erosión), que generará los mayores acúmulos en la zona submareal. La playa pasará de tener elevadas pendientes durante el verano a pendientes más suaves durante el invierno, lo que favorece la disipación de la energía. Por tanto, los sistemas dunares bien desarrollados compensan los eventos erosivos que, de forma natural, se producen en la costa durante los temporales invernales. Por un lado, estas dunas devuelven parte de la arena que habían captado durante las condiciones de buen tiempo, disminuyendo así la erosión en la propia playa, y por otro lado amortiguan el efecto del oleaje incidente, al ser más porosas y con menor pendiente que un rompeolas. Por otro lado, los acúmulos submareales forman barras arenosas que disipan la energía del oleaje, haciendo romper las olas más grandes fuera de la playa seca. Por ello, la extracción de arenas, o la ocupación y transformación de playas y dunas para la instalación de vías de comunicación, fines urbanísticos, turísticos o de ocio, desencadenan procesos de erosión y deterioro de estos ambientes, de manera irreversible.

Por último, las obras de defensa costera también afectan a la estabilidad de las playas. Los diques, espigones y obras portuarias interrumpen el transporte longitudinal de sedimento, creando zonas de depósito aguas arriba de la estructura y áreas sometidas a erosión aguas abajo, e incluso llegan a cambiar la morfología costera al variar el ángulo de incidencia del oleaje (Martínez *et al.*, 2002). Estos efectos de los espigones se conocen desde antiguo y en España existen multitud de ejemplos que los ilustran. En cuanto a las estructuras paralelas a la línea de costa, como rompeolas y recubrimientos, acaban generando otros problemas como la desaparición de las playas que tienen delante, por aumento de la energía reflejada, o el aumento de las corrientes de resaca en el caso de estructuras exentas y sumergidas.

BIBLIOGRAFÍA

- Anfuso, G.; Domínguez, L. y Gracia, F.J. (2007). Short and medium-term evolution of a coastal sector in Cadiz, SW Spain. *Catena*, 70 (2), 229-242.
- Barragán, J. M. (2004). Las áreas litorales de España. *Del análisis geográfico a la gestión integrada*. Ariel, Barcelona, 214 pp.
- Bowden, K.F. (1983). *Physical oceanography of coastal waters*. John Wiley, 302 pp.
- Bruun, P. (1954). *Coastal erosion and the development of beach profiles*. U.S. Army Corps of Engineers, Beach erosion board. Tech. Memor., nº 44.
- Carter, R.W.G. (1991). *Coastal environments*. Academic Press, 617 p.
- Cooper, J.A.G. y Pilkey, O.H. (2004). Sea-level rise and shoreline retreat: time to abandon the Bruun Rule. *Global and Planetary Change*, 43, 157-171.
- Dabrio, C.J. y Zazo, C. (1987). Riesgos geológicos en zonas litorales. En F.J. Ayala; J.J. Durán y T. Peinado (coords.): *Riesgos geológicos*, IGME, pp. 227 - 250.
- Díaz De Terán, J.R. y Cendrero, A. (1992). Riesgos geológicos en España. *XXVI Curso de Geología Práctica*. Univ. de Verano, Teruel, p.p 179 - 231.
- Fenster, MS, Dolan, R, Morton, RA. (2001). Coastal storms and shoreline change: signal or noise? *Journal of Coastal Research*, 17 (3), 714 -720.
- Fernández-Salas, L.M.; Dabrio, C.J.; Goy, J.L.; Díaz del Río, V.; Zazo, C.; Lobo, F.J.; Sanz, J.L. y Lario, J. (2009). Land-sea correlation between Late Holocene coastal and infralittoral deposits in the SE Iberian Peninsula (Western Mediterranean). *Geomorphology*, 104, 4-11.
- Ferreira, O. (2005). Storm groups versus extreme single storms: predicted erosion and management consequences. *Journal of Coastal Research*. SI42, 221-227.
- Gracia, F.J.; Alonso, C.; Benavente, J. y López Aguayo, F. (2000). Evolución histórica de la línea de costa en la Bahía de Cádiz. En J.R. de Andrés y F.J. Gracia (eds.): *Geomorfología Litoral. Procesos activos*. Monogr. S.E.G. nº 7, ITGE y Serv. Publ. Univ. Cádiz, p. 225 - 234.
- Gracia, F.J.; Del Río, L.; Alonso, C.; Benavente, J. y Anfuso, G. (2006). Historical evolution and present state of the coastal dune systems in the Atlantic coast of Cádiz (SW Spain): Palaeoclimatic and environmental implications. *Journal of Coastal Research*, S.I. 48, 55 - 63.
- Holman, R.A. (1986). Extreme value statistics for wave run-up on a natural beach. *Coastal Engineering*, 9, 527-544.
- IPCC (2007). Climate Change 2007: Synthesis Report. En: Core Writing Team, R.K. Pachauri & A. Reisinger (Eds.), *Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, Ginebra, Suiza, 104 p.
- Jiménez, J.A. y Sánchez-Arcilla, A. (1993). Medium-term coastal response at the Ebro delta, Spain. *Marine Geology*, 114, 105-118.
- Lario, J.; Zazo, C.; Dabrio, C.; Somoza, L.; Goy, J.L.; Bardají, T. y Silva, P. (1995). Record of recent Holocene sediment input on spit bars and deltas of south Spain. *Journal of Coastal Research*. Special Issue nº 17, 241-245.
- Lozano, I.; Devoy, R.J.N.; May, W. y Andersen U. (2004). Storminess and vulnerability along the Atlantic coastlines of Europe: analysis of storm records and of a greenhouse gases induced climate scenario. *Marine Geology*, 210, 205-225.
- Martínez del Pozo, J.A.; Benavente, J.; Gracia, J. y Anfuso, G. (2002). Evolución reciente de la forma de equilibrio en planta de la playa de Valdelagrana (Bahía de Cádiz). *Aportaciones a la geomorfología de España en el inicio del tercer milenio*. Serie Geología nº1. I.T.G.E. pp. 355-361.
- MMA (Ministerio de Medio Ambiente) (2004). *Impacts en la costa española por efecto del cambio climático (Fase III)*. R. Medina (Coord.). 130 pp.
- Morton, R.A.; Gibeaut, J.C. y Paine, J.G. (1995). Meso-scale transfer of sand during and after storms: implications for prediction of shoreline movement. *Marine Geology*, 126, 161-179.
- Nicholls, R. J. (2002). Analysis of global impacts of sea-level rise: a case study of flooding. *Physics and Chemistry of the Earth*, 27, 1455-1466.
- Olcina, J. y Ayala, F. (2002). Riesgos naturales. Conceptos fundamentales y clasificación. En F. Ayala y J. Olcina (coords.): *Riesgos naturales*. Ariel Ciencia, p. 41-73.
- Roy, P.S., Cowell, P.J., Ferland, M.A. y Thom, B.G. (1994). Wave dominated coasts. In: Carter, R.W.G., Woodroffe, C.D. (Eds.), *Coastal Evolution: Late Quaternary Shoreline Morphodynamics*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 121- 186.
- Stone, G.W.; Liu, B.; Pepper, D. A. y Wang, P. (2004). The importance of extratropical and tropical cyclones on the short-term evolution of barrier islands along the northern Gulf of Mexico, USA. *Marine Geology*, 210, 63-78.
- Vellinga, P. (1982) Beach and dune erosion during storm surge. *Coastal Engineering*, 6, 361-387.
- VV.AA. (2005). Monográfico: Tsunami. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra. 13.1, AEPECT, 1-84.
- Zhang, K.; Douglas, B.C. y Leatherman, S.P. (2004). Global warming and coastal erosion. *Climatic Change*, 64, 41-58. ■

Este artículo fue solicitado desde E.C.T. el día 9 de diciembre de 2008 y aceptado definitivamente para su publicación el 27 de mayo de 2009.