



ANÁLISIS DE LA VULNERABILIDAD DE LOS ACANTILADOS ATLÁNTICOS DE LA PROVINCIA DE CÁDIZ ANTE LA EROSIÓN COSTERA

Analysis of Atlantic cliff vulnerability to coastal erosion in the province of Cadiz

Vulnerabilidad de acantilados ante la erosión costera

L. del Río y F. J. Gracia

*Dpto. de Geología, Fac. Ciencias del Mar y Ambientales, Universidad de Cádiz.
Avda. República Saharauí, s/n. 11510 Puerto Real (Cádiz)
E-mail: laura.delrio@uca.es*

Resumen: El presente estudio analiza la vulnerabilidad de los acantilados atlánticos gaditanos frente a la erosión costera. Para ello se realiza una aproximación semicuantitativa mediante la aplicación de un Índice de Vulnerabilidad Relativa que incluye los principales factores que afectan a la estabilidad de los acantilados de la zona, como litología, estructura, presencia o no de playa y/o plataforma rocosa, usos antrópicos de la zona, etc. El índice también incluye datos cuantitativos de retroceso costero derivados del estudio fotogramétrico comparado de diversos vuelos. Los resultados obtenidos permiten clasificar los acantilados gaditanos en función de su vulnerabilidad y ayudan a conocer los principales factores y procesos más importantes involucrados en su retroceso. Esta información resulta fundamental de cara a una planificación adecuada de usos en la Zona de Servidumbre de Protección del Dominio Público Marítimo-Terrestre aplicado a zonas acantiladas.

Palabras clave: Acantilados, retroceso de acantilados, riesgo de erosión, vulnerabilidad, fotogrametría, Golfo de Cádiz.

Abstract: This work presents an analysis of the vulnerability of Atlantic cliffs in the province of Cadiz (SW Spain) to coastal erosion. For this purpose a semi-quantitative approach has been taken by developing and applying a Relative Vulnerability Index that includes the most important factors affecting cliff stability in the area, such as lithology, internal structure, presence/absence of a beach or rocky shore platform, human activities in the area, etc. The index also includes quantitative cliff retreat data derived from the application of photogrammetric techniques to aerial photographs from different dates. Results allow to classify Cadiz cliffs according to their vulnerability to erosion, and provide insight into the main factors and processes involved in cliff recession in this area. This kind of information is essential in order to develop proper land use planning strategies in the Protection Easement Zone of the Coastal Public Property in clifffed areas.

Keywords: Cliffs, cliff retreat, erosion hazard, vulnerability, photogrammetry, Cadiz Gulf.



L. Del Río y F.J. Gracia (2007). Análisis de la vulnerabilidad de los acantilados atlánticos de la provincia de Cádiz ante la erosión costera. *Rev. C & G.*, 21 (1-2), 87-101.

1. Introducción

Se calcula que aproximadamente un 80% de las áreas litorales del mundo son costas rocosas (Trenhaile, 1987), incluyendo tanto litorales acantilados propiamente dichos como playas respaldadas por acantilados o soportadas por plataformas rocosas. La concentración de la población en zonas costeras afecta en gran medida a las áreas acantiladas, en las cuales se han construido edificios e infraestructuras que a menudo se encuentran amenazadas por la erosión costera. En consecuencia, el conflicto entre la ocupación antrópica y la inestabilidad inherente a estas zonas costeras se ha convertido en un problema de creciente importancia (Moore y Griggs, 2002).

En la literatura aparecen numerosos intentos de desarrollar métodos que permitan evaluar adecuadamente el comportamiento de las costas ante diferentes fenómenos naturales. Uno de ellos es el diseño de índices de vulnerabilidad o sensibilidad (Málvarez et al., 2000; McLaughlin et al., 2002), que han sido aplicados por algunos autores para clasificar las zonas costeras en función de su respuesta ante diversos fenómenos como el ascenso del nivel del mar (Gornitz, 1990), la inundación por temporales (Dal Cin y Simeoni, 1994; Simeoni et al., 2003) o la erosión costera debida a huracanes (Cambers, 1998). No obstante, hasta el momento no se ha desarrollado ningún índice que evalúe específicamente la vulnerabilidad de zonas acantiladas ante el riesgo de erosión costera. En este sentido, este tipo de riesgo se ha estimado fundamentalmente a partir de sus consecuencias, esto es, a partir de medidas fotogramétricas de retroceso de acantilados (Moore y Griggs, 2002; Garrote y Garzón, 2004), sin evaluar en la mayoría de los casos otros factores que pueden influir en su dinámica o en la caracterización del riesgo.

En el presente trabajo se realiza una evaluación de la vulnerabilidad que presentan los acantilados del litoral atlántico de la provincia de Cádiz (Suroeste de España) ante la erosión. En algunos puntos de la costa estudiada se ha registrado un retroceso considerable de los acantilados durante las últimas décadas (Domínguez et al., 2004; Anfuso et al., 2006), lo que ha llevado a un aumento de los conflictos existentes entre los procesos naturales actuantes sobre los acantilados y las acti-

vidades antrópicas desarrolladas en ellos. En este estudio se propone un Índice de Vulnerabilidad Relativa que tiene en cuenta diversas variables relacionadas con los procesos, factores y usos que afectan a los acantilados atlánticos gaditanos. El cálculo del índice se basa, entre otros datos, en medidas fotogramétricas comparadas y observaciones de campo. Los resultados obtenidos permiten realizar una catalogación y zonación de los acantilados estudiados en función de su mayor o menor susceptibilidad a sufrir retrocesos rápidos a corto y medio plazo y de las actividades humanas amenazadas por este proceso. Aunque la vigente Ley de Costas (1988) no recoge expresamente las tendencias de muchos acantilados al retroceso erosivo, la información obtenida con este método resulta fundamental para una correcta planificación de usos del Dominio Público Marítimo-Terrestre (DPMT) y de su Zona de Servidumbre de Protección (ZSP) en áreas acantiladas. De hecho, en la actualidad la gestión de acantilados activos está siendo incorporada a las políticas de la Dirección General de Costas como parte de la gestión del DPMT y su ZSP, de forma que se están incluyendo partidas presupuestarias específicas dedicadas al estudio y a la toma de medidas para la estabilización de acantilados en retroceso.

2. Área de estudio

La costa atlántica de la provincia de Cádiz, de aproximadamente 160 km de longitud, está orientada de forma general en dirección NO-SE (Fig. 1). Desde un punto de vista geológico, se puede dividir en dos sectores con características muy contrastadas.

El sector Norte de la costa, comprendido entre Sanlúcar de Barrameda y Caños de Meca (Barbate), corresponde a las estribaciones meridionales de la Depresión terciaria del Guadalquivir, formada por materiales neógenos postorogénicos subhorizontales (Fig. 2). En general se trata de una costa baja, lineal, controlada por fallas recientes con orientaciones NO-SE, NE-SO, N-S y E-O (Gracia et al., 1999; Gutiérrez-Mas et al., 2004). Entre Sanlúcar de Barrameda y El Puerto de Santa María los acantilados están constituidos por materiales detríticos poco compactos, como arenas



Figura 1. Localización del área de estudio. En línea discontinua se muestran los tramos finales de los principales cursos fluviales que desembocan en la costa atlántica gaditana.

Figure 1. Location map of the study area. Dashed lines show main coastal rivers and streams.

cuarcíticas, arcillas, margas, limos y ocasionalmente conglomerados siliciclácticos, de edad Plioceno-Pleistoceno. Más al Sur, entre Cádiz y Conil los acantilados están formados por depósitos detríticos más cementados (conglomerados y areniscas) aunque con importantes pasos laterales de facies hacia arenas, arcillas y margas, de edad Plioceno (“Roca Ostionera”, en La Barrosa y Cabo Roche) y Mioceno Medio (al Sur de las calas de Conil). El grado de fracturación de estas unidades es variable, aunque se puede considerar como bajo, consistente básicamente en algunas fallas NO-SE y NE-SO de pequeño salto y diaclasas muy espaciadas entre sí. No obstante, el retroceso de los acantilados, junto con los procesos de meteorización, el ataque basal del oleaje y los movimientos de masas favorecen la generación de fracturas verticales paralelas a los escarpes, que actúan como debilidades secundarias a menudo determinantes en la evolución de estos acantilados. Al Norte de Cádiz la altura de los acantilados suele ser de pocos metros, y sólo puntualmente se superan los 10 m de escarpe vertical

(Vistahermosa), mientras que entre Cádiz y Conil alcanzan mayores desniveles (hasta más de 20 m), merced a una acusada tectónica de bloques post-pliocena (Benkhelil, 1976).

Los aportes sedimentarios fluviales más importantes a la costa de la provincia se concentran en este sector Norte (ríos Guadalquivir, Guadalete y Salado de Conil, Fig. 1). La corriente de deriva litoral dominante, dirigida hacia el SE, distribuye estos aportes dando lugar a amplias playas arenosas, cuyo desarrollo disminuye progresivamente hacia el Estrecho de Gibraltar. En consecuencia, casi todos los acantilados del sector Norte desarrollan playas más o menos anchas a su pie, e incluso en algunos casos existen pequeñas dunas móviles, remontantes sobre los acantilados.

El sector Sur, comprendido entre Caños de Meca (Barbate) y Tarifa, corresponde al extremo occidental de las Cordilleras Béticas, y en él aparecen relieves de cierta magnitud labrados sobre series detríticas y calcáreas neógenas del complejo del Campo de Gibraltar (Fig. 2), falladas y plega-

das por la Orogenia Alpina (Gracia y Benavente, 2000). El grado de deformación y la complejidad tectónica aumentan hacia el Estrecho de Gibraltar, de modo que la costa predominantemente rectilínea del sector Norte da paso en el sector Sur a una costa joven, recortada, controlada por accidentes neotectónicos de direcciones predominantes NE-SO y NO-SE (Silva et al., 2005, 2006). Destaca el acantilado de Tajo de Barbate (Fig. 1), formado por un espectacular escarpe de unos 100 m de desnivel vertical, labrado sobre calcarenitas miocenas levemente basculadas. Entre las localidades de Zahara y Tarifa los acantilados se limitan a los promontorios rocosos y están formados fundamentalmente por arenas miocenas compactas que forman escarpes de alturas muy variables, en función de la estructura geológica de estas unidades. Localmente existen otros materiales que forman acantilados menores, como los conglomerados cuaternarios cementados de Punta Camarinal y Punta Paloma.

El grado de fracturación de todas estas unidades es mucho mayor que en el tramo Norte, especialmente en el caso de las arenas miocenas de la Unidad del Aljibe (Fig. 2). También destaca la alta densidad de diaclasas que afectan al depósito cuaternario litoral de Punta Camarinal.

En lo que respecta a los agentes dinámicos costeros, los vientos dominantes soplan de Poniente (procedentes del Atlántico, WNW) y de Levante (procedentes del ESE), siendo estos últimos especialmente energéticos en el Estrecho de Gibraltar y sus alrededores (Gracia y Benavente, 2000). El oleaje también presenta la dualidad Poniente/Levante, si bien dada la orientación de la costa el primero de ellos es predominante y mucho más importante como mar de fondo (*swell*). Los temporales marítimos invernales proceden también del Atlántico e influyen decisivamente en la dinámica costera, con alturas de ola medias significantes que pueden superar los 4 m. No obstante, la altura media del

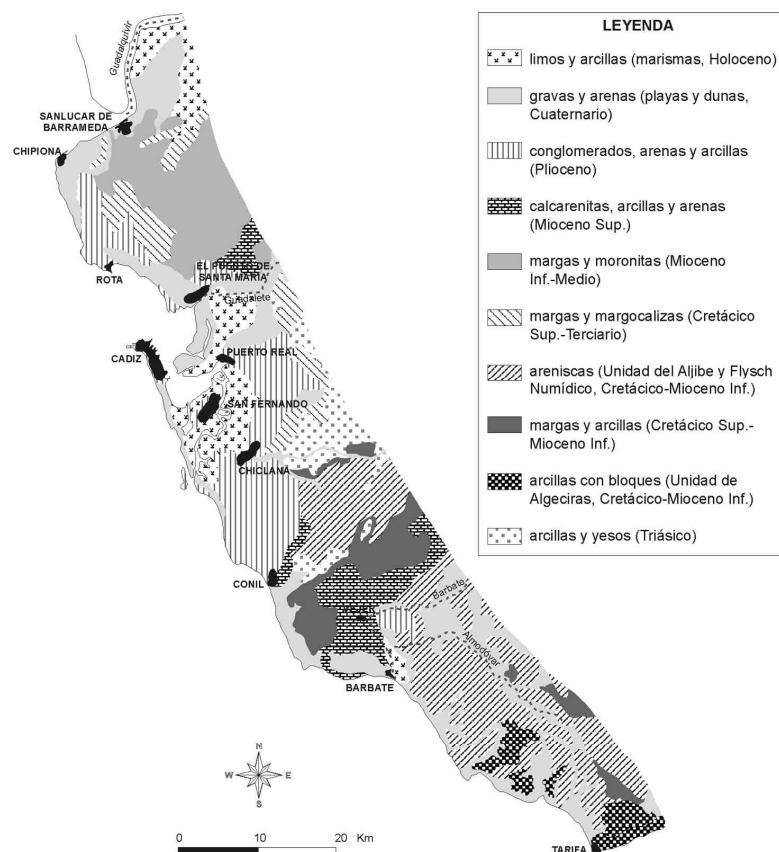


Figura 2. Esquema litológico de la zona de estudio (modificado de Gutiérrez-Mas et al., 1991).

Figure 2. Lithological sketch of the study area (modified from Gutiérrez-Mas et al., 1991).

oleaje de temporal es de 1,5 m, y la altura significante del oleaje de buen tiempo es de 0,6 m, por lo que toda la costa se puede clasificar como de baja energía (Benavente et al., 2000). El rango de mareas en la zona disminuye paulatinamente de Norte a Sur, pasando de mesomareal en la parte Norte de la provincia a prácticamente micromareal en las cercanías del Estrecho de Gibraltar.

En lo que respecta a la ocupación antrópica, los acantilados de la provincia de Cádiz presentan una gran variedad de usos, desde áreas densamente urbanizadas (Vistahermosa, Caños de Meca) a zonas naturales protegidas y en buen estado de conservación (Tajo de Barbate). Entre ambos extremos aparecen también tramos acantilados con otro tipo de usos del suelo (agrícolas, recreativos, etc.), siendo de especial relevancia el uso militar de muchas zonas acantiladas en las cercanías del Estrecho de Gibraltar.

3. Metodología

Con el fin de caracterizar el riesgo de erosión de los acantilados de la provincia de Cádiz, se diseñó un índice de vulnerabilidad mediante la evaluación de los principales factores implicados en los procesos de erosión de los acantilados de la zona. Para ello se analizaron y compararon las características de los diversos tramos de costa acantilada del área de estudio, y se escogieron nueve variables fundamentales (a_n) (Tabla 1). Siete de ellas corresponden a distintos factores que condicionan o determinan la erosionabilidad de un acantilado (litología, presencia de playa, orientación, etc.), a las que se añadió una variable relacionada con la situación de riesgo (usos antrópicos que pudieran verse afectados por la erosión). Por último, se incluyó también como variable el grado de erosión reciente registrada o estimada en el acantilado, por lo que se trata de una determinación de la vulnerabilidad basada en la propia respuesta del acantilado (Cooper y McLaughlin, 1998).

Cada variable fue dividida en 4 clases de influencia creciente en la vulnerabilidad de los acantilados, asignando a cada una de las clases una puntuación de 1 (menor vulnerabilidad) a 4 (mayor vulnerabilidad) (Tabla 1). Es importante destacar que esta clasificación se llevó a cabo tomando en

consideración los procesos y características presentes actualmente en la costa gaditana, por lo que se trata de un índice relativo y sólo aplicable a la zona de estudio (Simeoni et al., 2003).

La mayoría de las variables fueron evaluadas y clasificadas mediante el análisis de la información contenida en la literatura existente sobre el área de estudio y por inspección visual de los diversos tramos acantilados. El retroceso reciente de la línea de costa fue determinado mediante la realización de medidas estereoscópicas sobre 54 fotografías aéreas escaneadas procedentes de diversos vuelos fotogramétricos comprendidos entre los años 1956 y 2002, a escalas entre 1:18000 y 1:33000. La utilización del SIG ArcView™ (©ESRI) permitió la georreferenciación de los fotogramas y la posterior digitalización de la posición del borde del acantilado, así como el cálculo de las tasas de variación entre las líneas de costa resultantes (Thieler et al., 2003). Asimismo, para cada fotografía se estimó el error inherente a las medidas efectuadas, con el fin de dar un marco adecuado a las tasas de erosión calculadas anteriormente. Para ello se combinaron las metodologías propuestas por Anders y Byrnes (1991) y Zviely y Klein (2004) para diferentes tipos de error, resultando la expresión siguiente:

$$E = (G + I + D) / n^{1/2} \quad (1)$$

En cada fotografía, G representa el error resultante del proceso de georreferenciación, determinado a partir del error cuadrático medio del proceso (RMSE); I representa el posible error en la identificación de la posición del borde del acantilado, dependiente del tamaño del pixel de la imagen resultante; n es el número de puntos de control empleados en el proceso de georreferenciación; y D representa el error por desplazamiento de los objetos debido al relieve, especialmente importante en el caso de zonas de gran altura como algunos de los acantilados de la provincia. El cálculo de D se llevó a cabo mediante la expresión (Anders y Byrnes, 1991):

$$D = r h S / H \quad (2)$$

Para la zona de estudio, r es la distancia del borde del acantilado al punto central de la fotografía, h es la altura del acantilado, S es la escala de la imagen y H es la altura de vuelo a la que se tomó la fotografía; en cada variable se emplearon valores

Tabla 1. Clasificación de las variables que integran el índice de vulnerabilidad. 1-vulnerabilidad mínima, 4-vulnerabilidad máxima.

Table 1. Classification of variables included in the vulnerability index. 1-minimum vulnerability, 4-maximum vulnerability.

VARIABLE (a_n)	CLASIFICACIÓN	FACTOR (f_n)
A-Litología del acantilado	1- Calizas 2- Conglomerados siliciclásticos bien cementados 3- Areniscas detríticas 4- Depósitos Plio-Pleistocenos detríticos de granulometría variable, generalmente poco cementados	1
B-Discontinuidades secundarias	1- Homogéneo, sin discontinuidades significativas 2- Secuencias plegadas con alternancia de litologías duras/blandas 3- Arroyos e incisiones costeras 4- Fallas, fracturas y diaclasas	0,8
C-Presencia de playa	1- Playa amplia (las olas alcanzan el acantilado sólo cuando coinciden mareas vivas y oleaje de temporal) 2- Playa intermedia (las olas alcanzan el acantilado en mareas vivas o durante los temporales) 3- Playa estrecha (las olas alcanzan el acantilado con las pleamaras diarias) 4- Sin playa	1
D-Presencia de plataforma rocosa	1- Plataforma intermareal ancha y continua 2- Plataforma intermareal estrecha y discontinua 3- Plataforma submareal 4- Sin plataforma	0,8
E-Erosión reciente registrada o estimada visualmente	1- Sin erosión significativa (ni registrada ni estimada) 2- Erosión baja (estimada visualmente, pero a una escala demasiado pequeña para ser medida en las fotografías aéreas) 3- Erosión media (estimada visualmente y medible sobre las fotografías aéreas, pero la tasa está dentro del error de medida) 4- Erosión alta (estimada visualmente y medida sobre las fotografías aéreas)	1
F-Usos del terreno actuales	1- Áreas naturales sin urbanizar, sin estructuras antrópicas ni usos económicos relevantes 2- Áreas agrícolas o con infraestructuras básicas de acceso 3- Edificaciones dispersas 4- Áreas densamente urbanizadas	0,6
G-Estructuras de ingeniería costeras	1- Escollera o muro de contención 2- Estructura de protección abandonada o puntual 3- Sin estructuras ingenieriles 4- Diques o espigones cercanos que causan erosión inducida	0,6
H-Rango mareal	1- Macromareal (no considerado) 2- Mesomareal ($MSTR > 2m$) 3- Mesomareal bajo ($MSTR < 2m$) 4- Micromareal (no considerado)	0,4
I-Orientación de la costa (exposición al oleaje de temporales del 4º cuadrante)	1- Sector sur de la costa 2- Sector norte de la costa orientado al Sur 3- Sector norte de la costa orientado al Oeste 4- Sector norte de la costa orientado al Norte	0,8

medios, por lo que los cálculos del error fueron únicamente estimativos.

Tras la clasificación de las variables, se optó por realizar una ponderación de las mismas (Gornitz et al., 1994), con el fin de evitar la subestimación de las variables más relevantes localmente, así como la sobreestimación de las menos determinantes. Para ello se emplearon factores de corrección (f_n) entre 0,4 y 1, en función de la importancia relativa de cada variable a la hora de determinar la vulnerabilidad de los acantilados ante la erosión. De esta forma, las variables se clasificaron en cuatro tipos a los que se asignaron diferentes factores de ponderación (Tabla 1):

- naturales determinantes ($f_n = 1$)
- naturales indirectas ($f_n = 0,8$)
- antrópicas ($f_n = 0,6$)
- naturales secundarias ($f_n = 0,4$)

La vulnerabilidad absoluta (V_{abs}) se calculó para cada tramo acantilado mediante la suma de los valores de las variables ponderadas:

$$V_{abs} = a_n f_n \quad (3)$$

Posteriormente, se normalizaron los resultados con respecto a los valores máximo y mínimo teóricos del índice, con el fin de obtener el Índice de Vulnerabilidad Relativa (VR), más realista y expresado como porcentaje de la vulnerabilidad máxima teórica. Es decir:

$$\text{máx rango } V_{abs} = \text{máx } V_{abs} - \text{mín } V_{abs} \quad (4)$$

$$V_R = [(V_{abs} - \text{mín } V_{abs}) / \text{máx rango } V_{abs}] * 100 \quad (5)$$

4. Resultados y discusión

Los resultados muestran cómo los acantilados de la costa Norte de la provincia son los más vulnerables a la erosión, donde los valores máximos de V_R corresponden a las zonas de Punta Montijo y La Ballena-Peginas (Fig. 3). Al igual que en el resto del litoral gaditano, la litología constituye el principal factor determinante del retroceso costero en esta zona (Tabla 2). La importante erosión registrada en estas zonas, con tasas de retroceso que alcanzan los 2 m/año en algunos puntos (Domínguez et al., 2004), se relaciona principalmente con la existencia de cambios laterales de facies, que exponen materiales blandos como arcí-

llas y paleosuelos cuaternarios a la acción del oleaje. A pesar de la presencia de playas y plataformas rocosas que protegen los acantilados disipando la energía del oleaje incidente, dichos materiales son fácilmente erosionables (Fig. 4A). La mayor vulnerabilidad de toda el área de estudio corresponde a Punta Montijo (62,9%), donde los factores anteriores se suman a la orientación de la costa, que determina una exposición directa a los oleajes de temporal del Oeste-Noroeste (Fig. 5).

Algunas áreas de la zona central de la costa gaditana presentan también valores elevados de vulnerabilidad ante la erosión (Fig. 3). En la zona de Torre del Puerco, la playa es relativamente ancha en casi todo el tramo acantilado e impide que el oleaje modal alcance la base del acantilado, razón por la cual se pueden observar indicadores de erosión en el campo (Fig. 4B), pero generalmente no es posible cuantificar dicha erosión sobre las fotografías aéreas. Sin embargo, este acantilado compuesto básicamente por conglomerados bioclasticos cementados y arenas está sometido a procesos de erosión hidráulica, que excavan cárcavas y barrancos que afectan a su estabilidad. Asimismo, las urbanizaciones ubicadas sobre el acantilado disminuyen la resistencia de los materiales que lo forman y favorecen su fracturación. En consecuencia, este área se clasifica como muy vulnerable, con un valor de VR de 52,4% (Tabla 2).

Muy cerca de este punto, los acantilados de las Calas de Conil también presentan valores de vulnerabilidad considerables, que se pueden atribuir principalmente a la actividad humana. Desde la construcción en 1984 del puerto de La Almadraba en la desembocadura del río Roche, el aporte de sedimentos a las calas, tanto fluviales como asociados a las corrientes de deriva litoral, ha disminuido drásticamente, mientras que el interior del puerto sufre problemas periódicos de aterramiento (Fig. 6). La erosión de las pequeñas playas existentes deja la base de los acantilados desprotegida ante la acción del oleaje, de manera que el retroceso costero de esta zona ha sido cuantificado en 0,4 m/año en algunos puntos.

Valores moderados de V_R , en torno al 48%, aparecen en diversas zonas de la provincia, concretamente en los acantilados de Vistahermosa, La Barrosa y Caños de Meca (Tabla 2). En Vistahermosa, el acantilado está protegido de la

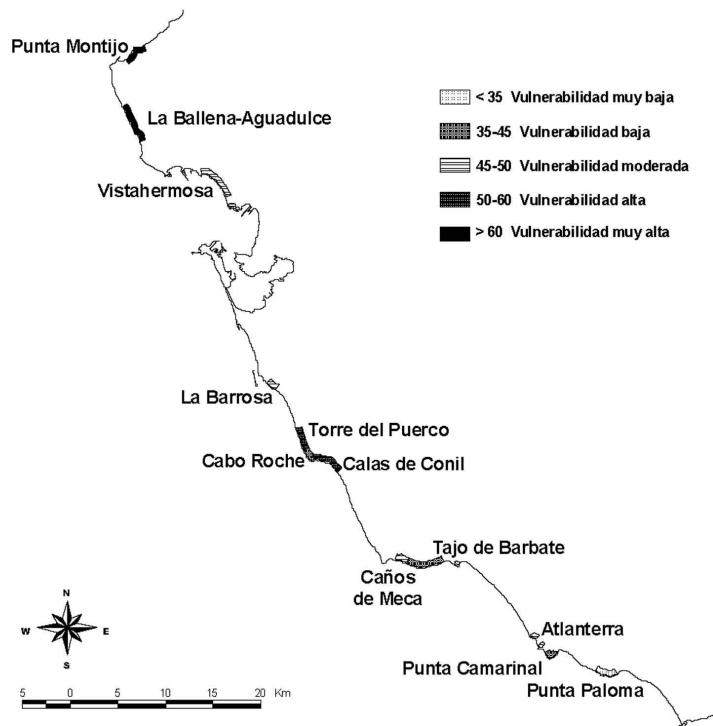


Figura 3. Distribución de la vulnerabilidad de los acantilados atlánticos de la provincia de Cádiz ante la erosión costera.

Figure 3. Map showing cliff vulnerability to erosion in the Atlantic coast of Cádiz province.

acción del oleaje por una amplia playa y un muro de contención al pie del escarpe, pero está compuesto por margas fácilmente erosionables y se encuentra densamente urbanizado en su parte superior. En La Barrosa la vulnerabilidad se debe a una combinación de factores, entre los cuales cabe destacar la práctica ausencia de playa protegiendo la base del acantilado, así como la baja resistencia de los materiales que lo forman (conglomerados pliocenos y arenas cuaternarias), lo que produce frecuentes desplomes (Fig. 4C); aquí el retroceso del acantilado alcanza los 0,3 m/año en algunos puntos. En Caños de Meca, el acantilado está constituido por margas fácilmente erosionables que no están afectadas por debilidades secundarias, y se encuentra en cierta medida protegido por una estrecha playa y una plataforma rocosa discontinua, pero la presencia del núcleo turístico de Caños de Meca sobre el acantilado contribuye a aumentar su vulnerabilidad. En esta zona se producen ocasio-

nalmente pequeños desplomes que han llegado a afectar a los accesos a la playa (Fig. 7A). Más al Sur, el área de Atlanterra muestra una vulnerabilidad ligeramente menor, apareciendo como un acantilado estable a pesar de la práctica ausencia de playa.

Valores relativamente bajos de V_R aparecen en distintas áreas a lo largo de la costa de la provincia (Tabla 2). Los acantilados de Cabo Roche (Fig. 7B) están situados entre Torre del Puerco y Calas de Conil, ambas zonas muy vulnerables, y están constituidos por el mismo tipo de materiales; sin embargo, la práctica ausencia de debilidades secundarias y estructuras antrópicas de cualquier tipo, así como la existencia de una plataforma rocosa, determinan el bajo riesgo de erosión de estos acantilados (44,8%). Por el contrario, el Tajo de Barbate presenta una acusada densidad de fracturas y diaclasas (Fig. 8A), que contribuyen a frecuentes caídas de bloques; sin embargo, a pesar de la ausencia de

Tabla 2. Resultados del cálculo del índice de vulnerabilidad VR para los distintos tramos acantilados de la costa gaditana.

Table 2. Results from the computation of the vulnerability index VR in the clifffed areas of Cadiz coast.

ZONA	VARIABLES									Vabs	Vr
	A	B	C	D	E	F	G	H	I		
Punta Montijo	4	3	2	1	4	3	2	2	4	20,2	62,9
Ballena-Peginas	4	3	2	1	4	3	3	2	3	20,0	61,9
Vistahermosa	4	1	2	3	1	4	1	2	3	16,4	44,8
La Barrosa	4	1	3	1	3	2	2	2	3	17,2	48,6
Torre del Puerco	2	3	1	4	2	4	3	2	3	18,0	52,4
Cabo Roche	2	1	3	3	2	2	3	2	3	16,4	44,8
Calas de Conil	2	1	3	3	3	3	4	2	2	17,8	51,4
Caños de Meca	4	1	2	2	2	4	3	2	2	17,0	47,6
Tajo de Barbate	1	4	4	3	1	1	3	2	2	16,4	44,8
Atlanterra	3	2	4	2	1	3	3	3	1	16,8	46,7
Punta Camarinal	2	4	4	2	1	1	3	3	1	16,2	43,8
Punta Paloma	3	2	2	2	1	2	3	3	1	14,2	34,3

playa y la poca anchura de la plataforma rocosa, este acantilado vertical de 100 m de altura está labrado sobre calcarenitas muy resistentes ante el ataque del oleaje. Además, se trata de una zona protegida como Parque Natural en la que no existe ninguna infraestructura antrópica en riesgo de sufrir daños por el posible retroceso del acantilado, y en consecuencia el valor de vulnerabilidad es también del 44,8%.

También Punta Camarinal se puede clasificar como un acantilado de baja vulnerabilidad (Tabla 2). A pesar de estar afectado por fallas y diaclasas, está compuesto por conglomerados siliciclásticos relativamente resistentes. Se localiza en la parte Sur del área de estudio (Fig. 3), donde la energía del oleaje de Poniente es menor que en el sector Norte. Por otro lado, los fuertes vientos de Levante que azotan este sector, no tienen una distancia de *fetch* suficiente para generar oleajes de importancia. Este hecho, junto con la presencia de una plataforma rocosa discontinua, favorecen las condiciones de estabilidad que se registran actualmente en Punta Camarinal, a lo que contribuye también su ubicación en una zona militar sin infraestructuras antrópicas sobre el acantilado (Fig. 8B).

El acantilado menos vulnerable de toda la costa estudiada es el de Punta Paloma, con un valor de VR del 34,3%. Es el acantilado más meridional de la provincia (Fig. 1), y precisamente su localiza-

ción y orientación son en gran medida responsables de su baja vulnerabilidad, ya que las areniscas que lo forman quedan protegidas del ataque directo del oleaje más energético. También tiene gran importancia la presencia de playa y plataforma rocosa, así como la práctica ausencia de estructuras antrópicas amenazadas por la posible erosión, ya que también forma parte de una zona militar prácticamente despoblada. No obstante, las actuaciones antrópicas llevadas a cabo en el cercano sistema eólico de Betis-Valdevaqueros hasta los años 60 han motivado una reducción en la anchura de la playa que podría afectar negativamente al acantilado en un futuro próximo.

Además de las zonas descritas, en la costa gaditana existen algunos acantilados puntuales que no se han incluido dentro de los cálculos del índice de vulnerabilidad por tratarse de tramos de longitud inferior a los 200 m. En algunos de ellos existen infraestructuras antrópicas afectadas por la erosión y protegidas artificialmente, como es el caso del Cabo de Trafalgar (Barbate), un conglomerado cuarcítico del Pleistoceno que forma un islote rocoso unido a la costa por un doble tóbolo. La erosión del acantilado en la zona oeste del islote llevó a la construcción de una escollera en 1991, con el fin de proteger el faro ubicado sobre él. En las cercanías de Tarifa, el acantilado de Torre de la Peña presenta tramos alternantes de areniscas y margas

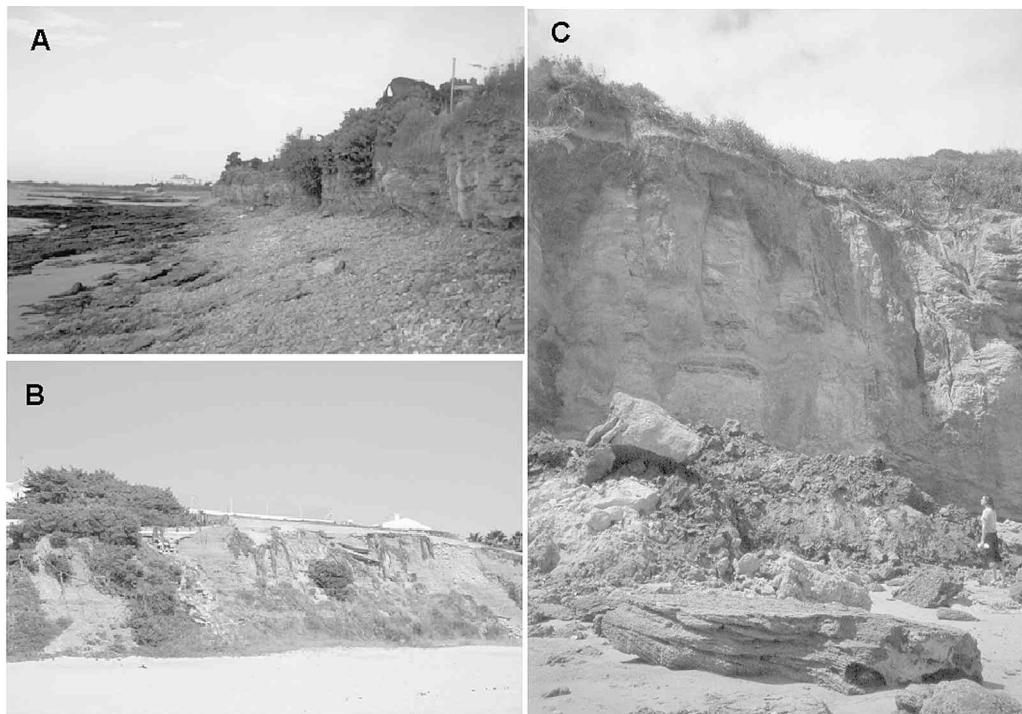


Figura 4. A: Microacantilado erosivo en las cercanías de Punta Montijo. B: Movimientos de masas (deslizamientos y desplomes) junto a las infraestructuras ubicadas sobre el acantilado de Torre del Puerco. C: Desplome en el acantilado de La Barrosa.

Figure 4. A: Eroding microcliff near Punta Montijo. B: Mass movements (slides) besides human structures on top of Torre del Puerco cliff. C: Rock fall in La Barrosa cliff.

miocenas; la elevada erosionabilidad de estas últimas ha causado un retroceso del acantilado que amenaza en la actualidad las instalaciones de un camping y un restaurante, que se encuentran en parte protegidos por una escollera. Una tercera zona no incluida en el presente estudio, en este caso por la escasa disponibilidad de fotografías aéreas y la dificultad de acceso, es el acantilado situado en la Base Aeronaval de Rota, al norte de la Bahía de Cádiz. Aquí la línea de costa ha retrocedido en las últimas décadas a un ritmo de hasta 0,6 m/año en algunas zonas, por lo que se han instalado diversos tipos de barreras para intentar proteger el acantilado y las viviendas situadas sobre él.

Cabe destacar que en numerosas zonas de la provincia de Cádiz, la importancia de la litología del acantilado como determinante de la vulnerabilidad ante la erosión es compensada por el papel protector que desempeñan las playas y/o platafor-

mas rocosas. La variabilidad morfológica de las zonas inter e infralitoral (*foreshore* y *nearshore*) induce cambios en la energía del oleaje a la que están expuestos los acantilados. Asimismo, la orientación de la costa tiene una gran influencia en la vulnerabilidad, ya que determina el grado de exposición al oleaje erosivo de los temporales.

No obstante, la evolución dinámica de los acantilados, y por tanto su vulnerabilidad, están básicamente condicionadas por procesos de movimientos de masas, como deslizamientos y caídas de bloques (Trenhaile, 1987). En algunos puntos de la costa de la provincia, como Cabo Roche, los acantilados evolucionan de manera claramente cíclica: la erosión basal por parte del oleaje desencadena movimientos de masas que favorecen la acumulación de derrubios al pie del acantilado, los cuales son posteriormente removilizados y retirados gradualmente por el oleaje y las corrientes, que continúan ero-



Figura 5. Evolución, a partir de fotografías aéreas, de un tramo acantilado en las cercanías de Punta Montijo. Nótese el progresivo retroceso de la línea de costa de 1977 a 1992 y 2002.

Figure 5. Shoreline evolution near Punta Montijo, recorded from aerial photographs. Note the continuous retreat of the cliff top from 1977 to 1992 and 2002.

sionando la base, de forma que comienza un nuevo ciclo. En otras zonas como Vistahermosa y Torre del Puerco, los acantilados parecen haber alcanzado una pendiente de equilibrio o pendiente de Richter (Selby, 1982), y presentan perfiles suavizados y cubiertos de vegetación.

En algunos casos, los movimientos de masas pueden verse favorecidos por diversos factores inherentes al acantilado, incluidos en el desarrollo del índice de vulnerabilidad, como la estructura interna o la resistencia mecánica de los materiales que lo componen. También pueden influir ciertas variables meteorológicas, como las precipitaciones o las oscilaciones térmicas, si bien estos factores no han sido considerados en el presente trabajo, ya que las precipitaciones y las temperaturas son prácticamente uniformes a lo largo de la costa de la provincia. Por otro lado, las significativas diferencias existentes en la intensidad de los vientos que soplan en la parte norte y la parte sur del área de

estudio no afectan a la vulnerabilidad ante la erosión a escala de décadas, y sólo actúan de manera muy indirecta sobre los procesos de meteorización en el acantilado. Otras consecuencias del régimen de vientos, como son las diferencias en el oleaje que generan, se han tenido en cuenta al establecer la variable I (Tabla 1).

En cuanto al rango mareal, contrariamente a lo observado por Gornitz et al. (1994), no se han observado indicadores que delaten una influencia importante sobre los procesos de erosión de los acantilados de la zona, razón por la cual esta variable se clasificó como natural secundaria en la ponderación y se le adjudicó un peso de 0,4 al calcular el índice V_R (Tabla 1). Las oscilaciones eustáticas en las últimas décadas han sido escasas y de similar magnitud a lo largo de toda la zona de estudio (PSMSL, 2005), por lo que no han sido tenidas en cuenta.

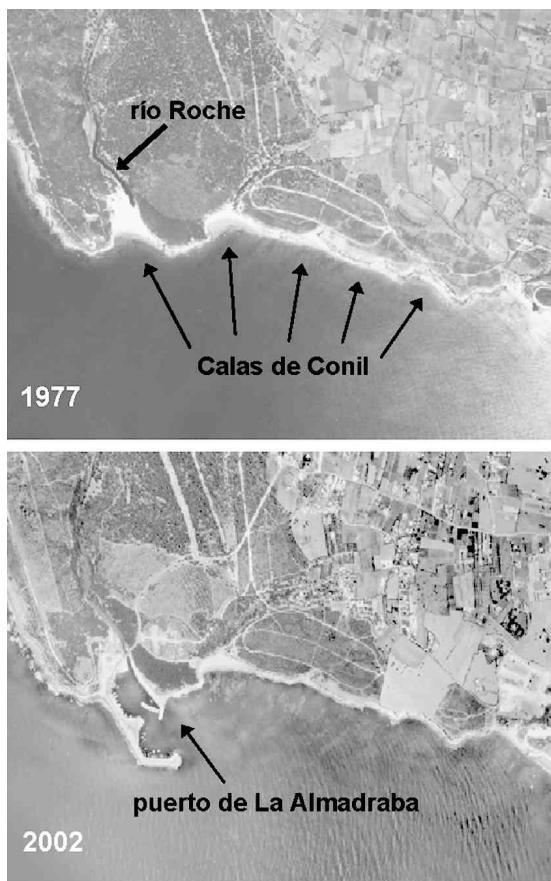


Figura 6. Situación de las calas occidentales de Conil antes y después de la construcción del puerto de La Almadraba. Nótese la reducción en la anchura de las playas, no atribuible a variaciones mareas entre ambas fotos.

Figure 6. Westernmost part of Calas de Conil area before and after the construction of La Almadraba harbour. Note the decrease in beach width between both photographs, not attributable to tidal changes.

En lo que respecta a la influencia antrópica en la erosión de los acantilados, la presencia humana constituye tanto un factor intrínseco de la vulnerabilidad como una causa directa de erosión en muchos casos. Las actividades desarrolladas en algunas áreas pobladas son en cierto modo responsables del riesgo de sufrir daños a causa del retroceso de los acantilados. En este sentido, la vigente Ley de Costas (Ley 22/1988) podría teóricamente

constituirse en una herramienta adecuada para prevenir los riesgos asociados a la urbanización sobre acantilados activos. Sin embargo, las construcciones erigidas sobre los acantilados antes de la entrada en vigor de dicha ley, así como los permisos de urbanización firmados con anterioridad a su puesta en marcha, limitan en gran medida la aplicabilidad de la Ley en zonas vulnerables como Torre del

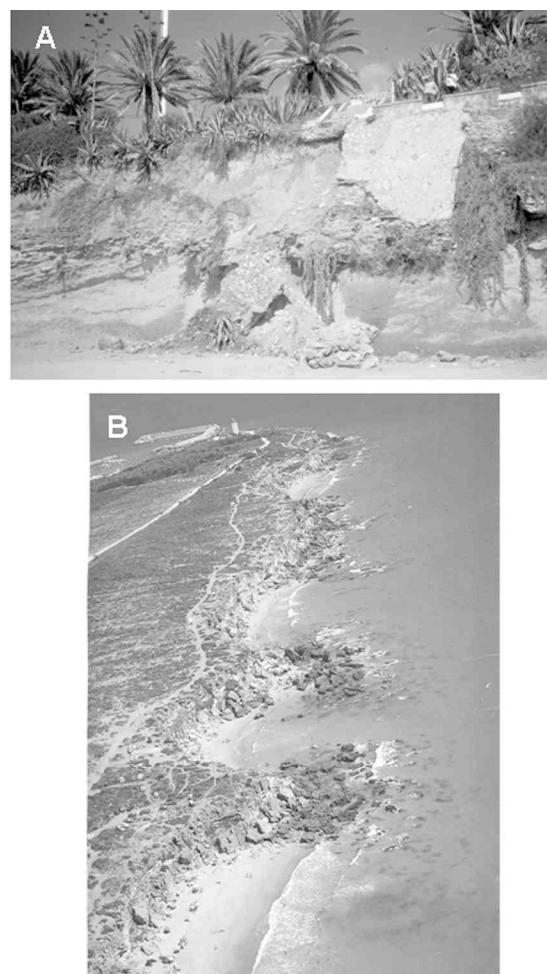


Figura 7. A: Desplome en el acantilado de Caños de Meca, afectando a la escalera de acceso a la playa. B: Vista aérea oblicua de las calas de cabo Roche (Fotografía: Dirección General de Costas, Ministerio de Medio Ambiente).

Figure 7. A: Slump in Caños de Meca cliff, affecting the stairs that give access to the beach. B: Oblique aerial view of Cabo Roche pocket beaches (Photo: Dirección General de Costas, Ministerio de Medio Ambiente).

Puerco o Caños de Meca. Asimismo, ciertos aspectos de la Ley de Costas no satisfacen la protección ambiental que sería deseable para zonas acantiladas vulnerables a la erosión. Según la Ley, la construcción está prohibida en el Dominio Público Marítimo Terrestre (DPMT), que en zonas acantiladas se extiende entre la bajamar máxima viva equinoccial (BMVE) y la coronación del acantilado,

do, siempre y cuando éste sea considerado como tal, para lo cual debe cumplir la condición de presentar una pendiente igual o superior al 60%. Como consecuencia, las zonas vulnerables situadas justo detrás del DPMT (Zonas de Servidumbre de Protección) continúan en muchos casos siendo ocupadas por asentamientos humanos, como en Torre del Puerco o en las Calas de Conil.

Por otra parte, la erosión de acantilados tiene consecuencias muy contrastadas. Por un lado, amenaza a las infraestructuras y actividades ubicadas en su coronación, pero al mismo tiempo los acantilados en erosión constituyen una fuente de sedimentos para las playas adyacentes, excepto donde los acantilados están constituidos por rocas muy resistentes, o por sedimentos demasiado finos para permanecer en las playas, como sucede en la zona de La Ballena-Peginas. En consecuencia, el uso de estructuras de protección como escolleras o revestimientos para reducir la erosión de los acantilados a menudo conlleva la disminución del aporte sedimentario a las playas situadas corriente abajo, incrementándose en ellas el riesgo de erosión.

Finalmente, en lo que respecta al método empleado en el presente trabajo, el cálculo de índices de vulnerabilidad lleva implícita una cierta carga de subjetividad, que parte del propio concepto de vulnerabilidad como juicio de valor desde el punto de vista antrópico (McLaughlin et al., 2002). Como consecuencia, la elección de las variables que forman parte del índice, su clasificación y especialmente su ponderación, deben ser realizadas con especial cuidado y tras una sistemática inspección de campo. En el caso de la evolución reciente de los acantilados, su cuantificación debe ser realizada de forma muy precisa, ya que normalmente los cambios en este tipo de ambientes son muy lentos y presentan un carácter episódico. En este sentido, es de suma importancia contar con fotografías aéreas de una escala detallada, a ser posible mayor de 1:10.000, que permitan apreciar las pequeñas variaciones en la morfología de los acantilados.

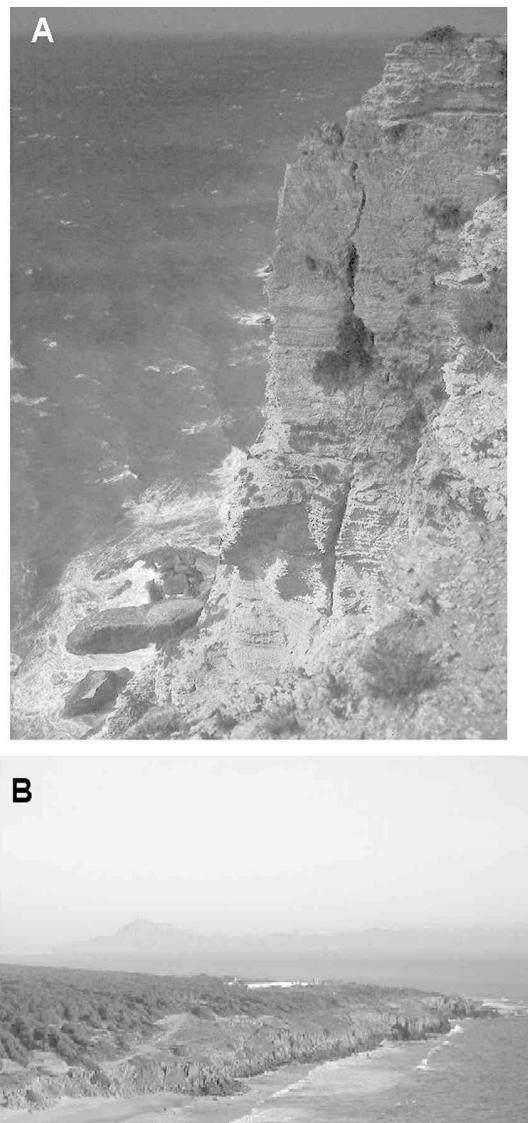


Figura 8. A: Fractura vertical en el Tajo de Barbate. B: Promontorio y acantilado de Punta Camarinal; al fondo se aprecia la costa africana.

Figure 8. A: Vertical fracture on Tajo de Barbate cliff. B: Punta Camarinal headland and cliff; the African coast can be seen on the background.

5. Conclusiones

La erosión de una costa acantilada es un proceso irreversible que causa la pérdida de tierras y pone en peligro los recursos económicos y natura-

les de una zona costera. Este trabajo muestra cómo el riesgo de erosión en los acantilados atlánticos de la provincia de Cádiz viene determinado por un gran número de factores, entre los cuales destacan la litología, la orientación de la costa y la presencia de playa o plataforma rocosa frente al acantilado. Como aproximación preliminar, el uso del índice normalizado VR para evaluar la vulnerabilidad ante la erosión proporciona una estimación semi-cuantitativa de las distintas variables que se encuentran implicadas en el riesgo de erosión, y facilita la comparación directa de la vulnerabilidad de las diferentes zonas acantiladas del área de estudio.

Los resultados obtenidos permiten diferenciar en primer lugar una zona septentrional con acantilados de elevada vulnerabilidad ante la erosión costera, y una zona central moderadamente vulnerable. Esta diferenciación se relaciona principalmente con dos factores: la litología, ya que los acantilados del extremo Norte de la provincia están constituidos por sedimentos recientes poco consolidados, y la orientación, ya que esta zona se encuentra expuesta a la acción directa de los temporales atlánticos. De hecho, en el sector comprendido entre las localidades de Sanlúcar, Chipiona y Rota existen en la actualidad importantes problemas de erosión de playas. La elevada vulnerabilidad que caracteriza a estos acantilados se ve reflejada en los altos valores del índice VR, notablemente superiores a los de las zonas moderadamente vulnerables del centro de la provincia.

Por otro lado, la mayor parte de los restantes acantilados de la costa gaditana muestra una vulnerabilidad moderada o media, con valores de V_R menos contrastados entre unas zonas y otras, por lo que la discriminación de diferentes clases dentro del grupo de acantilados con vulnerabilidad media es más difícil de llevar a cabo que la distinción entre los sectores muy vulnerables y las demás zonas.

Desde el punto de vista metodológico, los resultados del presente estudio han permitido constatar la gran utilidad de las herramientas SIG en diversos aspectos. Entre ellos cabe destacar la reducción del error al georreferenciar las fotografías aéreas, el establecimiento de las tasas de retroceso de acantilados, y la combinación de las diversas variables que constituyen el índice de vulnerabilidad.

El siguiente paso del estudio debe ser la generalización de las variables incluidas en el índice VR, con el fin de hacerlo aplicable a acantilados localizados fuera de la costa de Cádiz. En este sentido, cabría estudiar la inclusión de nuevas variables geomorfológicas en el índice, como la pendiente de la zona submareal y la altura y pendiente del acantilado, así como una mayor concreción de las variables antrópicas ya empleadas, como los usos del suelo.

Agradecimientos

Los autores agradecen las sugerencias propuestas por el Dr. Germán Flor y el Dr. Pau Balaguer, que han contribuido significativamente a la mejora del trabajo. Este estudio es una contribución al proyecto BTE2003-05706 (Ministerio de Ciencia y Tecnología) y al grupo de investigación RNM-328 del Plan Andaluz de Investigación (PAI). Este trabajo constituye asimismo una aportación a los proyectos IGCP 495 y 515.

Referencias bibliográficas

- Anders, F. J. & Byrnes, M. R. (1991). Accuracy of shoreline change rates as determined from maps and aerial photographs. *Shore & Beach*, 59 (1), 17-26.
- Anfuso, G., Domínguez, L. & Gracia, F.J. (2006). Short and medium-term evolution of a coastal sector in Cadiz, SW Spain. *Catena* (en prensa).
- Benavente, J., Gracia, F.J. & López-Aguayo, F.J. (2000). Empirical model of morphodynamic beachface behaviour for low-energy mesotidal environments. *Mar. Geol.*, 167, 375-390.
- Benkhelil, J. (1976). *Etude néotectonique de la terminaison occidentale des Cordillères Bétiques (Espagne)*. Tesis Doctoral, Univ. Nice, 180 pp.
- Cambers, G. (1998). *Coping with beach erosion*. UNESCO Publishing, París, 120 pp.
- Cooper, J.A.G. & McLaughlin, S. (1998). Contemporary multidisciplinary approaches to coastal classification and environmental risk analysis. *J. Coastal Res.*, 14 (2), 512-524.
- Dal Cin, R. & Simeoni, U. (1994). A model for determining the classification, vulnerability and risk in the southern coastal zone of the Marche (Italy). *J. Coastal Res.*, 10 (1), 18-29.
- Domínguez, L., Gracia, F.J. & Anfuso, G. (2004). Tasas de avance-retroceso de la línea de costa mediante morfometría fotogramétrica en el sector Sanlúcar de Barrameda – Rota (provincia de Cádiz). *Rev. Soc. Geol. España*, 17 (1-2), 71-86.

- Garrote, J. & Garzón, G. (2004). Análisis del retroceso del frente de costa usando fotogramas aéreos, Oyambre (Cantabria). En: *Procesos geomorfológicos y evolución costera* (Blanco Chao, R., López Bedoya, J. & Pérez Alberti, A., eds.). Serv. Publ. Univ. Santiago de Compostela, 51-65.
- Gornitz, V.M. (1990). Vulnerability of the East coast, USA to future sea level rise. *J. Coastal Res.*, SI 9, 201-237.
- Gornitz, V.M., Daniels, R.C., White, T.W. & Birdwell, K.R. (1994). The development of a coastal risk assessment database: Vulnerability to sea-level rise in the U.S. Southeast. En: *Coastal hazards: Perception, susceptibility and mitigation* (C.W. Finkl, ed.). *J. Coastal Res.*, SI 12, 327-338.
- Gracia, F.J. & Benavente, J. (2000). Geomorfología de la costa atlántica gaditana. En: *Geomorfología litoral. Procesos activos* (J.R. De Andrés & F.J. Gracia, eds.). Monografías de la SEG, nº 7, ITGE y Serv. Publ. Universidad de Cádiz, 237-255.
- Gracia, F.J., Rodríguez-Vidal, J., Benavente, J., Cáceres, L. & López Aguayo, F. (1999). Tectónica cuaternaria en la Bahía de Cádiz. En: *Avances en el estudio del Cuaternario español* (L. Pallí & C. Roqué, eds.). Univ. de Girona, 67 - 74.
- Gutiérrez-Mas, J.M., Achab, M. & Gracia, F.J. (2004). Structural and physiographic controls on the Holocene marine sedimentation in the Bay of Cadiz (SW Spain). *Geodin. Acta*, 17 (2), 47 - 55.
- Gutiérrez Mas, J.M., Martín Algarra, A., Domínguez Bella, S. & Moral Cardona, J.P. (1991). *Introducción a la geología de la provincia de Cádiz*. Serv. Publ. Universidad de Cádiz, 315 pp.
- Malvarez, G., Pollard, J. & Domínguez, R. (2000). Origins, management and measurement of stress on the coast of Southern Spain. *Coast. Manage.*, 28, 215-234.
- McLaughlin, S., McKenna, J. & Cooper, J.A.G. (2002). Socio-economic data in coastal vulnerability indices: constraints and opportunities. *J. Coastal Res.*, SI 36, 487-497.
- Moore, L.J. & Griggs, G.B. (2002). Long-term cliff retreat and erosion hotspots along the central shores of the Monterey Bay National Marine Sanctuary. *Mar. Geol.*, 181, 265-283.
- PSMSLPermanent Service for Mean Sea Level (2005). Página web del Proudman Oceanographic Laboratory: <http://www.pol.ac.uk/psmsl/>
- Selby, M.J. (1982). *Hillslope materials and processes*. Oxford University Press, Oxford, 264 pp.
- Silva, P.G., Borja, F., Zazo, C., Goy, J.L., Bardají, T., Luque, L., Lario, J. & Dabrio, C.J. (2005). Archaeoseismic record at the ancient Roman City of *Baelo Claudia* (Cádiz, south Spain). *Tectonophysics*, 408, 129 - 146.
- Silva, P.G., Goy, J.L., Zazo, C., Bardají, T., Lario, J., Somoza, L., Luque, L. & González-Hernández, F.M. (2006). Neotectonic fault mapping at the Gibraltar Strait Tunnel area, Bolonia Bay (South Spain). *Eng. Geol.*, 84, 31 - 47.
- Simeoni, U., Tessari, U., Gabbianelli, G. & Schiavi, C. (2003). Sea storm risk assessment in the Ravenna littoral (Adriatic Sea, Northern Italy). *Proceedings of the 6th International Conference on the Mediterranean Coastal Environment MEDCOAST'03* (E. Özhan, ed.), Vol. 3, Ravenna (Italia), 2223-2234.
- Thieler, E. R., Martin, D. & Ergul, A. (2003). *The Digital Shoreline Analysis System, version 2.0: Shoreline change measurement software extension for ArcView*. USGS Open-File Report 03-076.
- Trenhaile, A.S. (1987). *The Geomorphology of Rock Coasts*. Clarendon Press, Oxford, 384 pp.
- Zviely, D. & Klein, M. (2004). Coastal cliff retreat rates at Beit-Yannay, Israel, in the 20th century. *Earth Surf. Process. Landforms* 29, 175-184.