



ANÁLISIS Y CARTOGRAFÍA DE PELIGROSIDAD GEOLÓGICA EN EL LITORAL DE CEUTA

Manuel Abad ^(1,2), Nieves López-González ⁽³⁾, Joaquín Delgado ⁽⁴⁾, Joaquín Rodríguez-Vidal ⁽²⁾, S. Chamorro ⁽⁵⁾, Luis Miguel Cáceres ⁽²⁾ y Francisco Ruiz ⁽²⁾

⁽¹⁾ *Departamento de Geodinámica y Paleontología, Facultad de Ciencias Experimentales, Universidad de Huelva, Campus de El Carmen, 21071-Huelva (manuel.abad@dgyu.uhu.es)*

⁽²⁾ *The Gibraltar Museum, 18-20 Bomb House Lane, PO Box 939, Gibraltar (UK)*

⁽³⁾ *Instituto Español de Oceanografía, Centro Oceanográfico de Málaga. Puerto pesquero s/n, 29640-Fuengirola, Málaga.*

⁽⁴⁾ *Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Experimentales, Universidad de Huelva, Campus de El Carmen, 21071-Huelva*

⁽⁵⁾ *Instituto de Estudios Ceutíes, Paseo del Revellín 30, 51080-Ceuta*

Resumen: La Ciudad Autónoma de Ceuta posee un litoral con una longitud de más 25 km donde se concentra gran parte de su población. En estas costas se describen numerosos procesos geológicos que conllevan una importante peligrosidad potencial para la vida humana e infraestructuras. El objetivo de este trabajo es describir y analizar cada uno de estos procesos mediante la construcción de mapas de peligrosidad de inundaciones y avenidas fluviales; deslizamientos y caída de rocas; y temporales, tsunamis y ascenso del nivel del mar. Aunque aproximadamente sólo el 15% del territorio de Ceuta se encuentra afectada potencialmente por algún tipo de proceso peligroso, hay que destacar que más del 70% de la superficie de su litoral sí se encuentra expuesto. Las zonas consideradas de mayor peligrosidad coinciden con espacios donde se concentran varios tipos de procesos que actúan con grados de peligrosidad alta a muy alta. Son sectores costeros relativamente planos, aunque anexos a zonas más escarpadas, donde desembocan arroyos y barrancos que presentan un comportamiento de marcado carácter estacional.

Palabras clave: cartografía, riesgos geológicos, deslizamientos, inundaciones, procesos costeros, Ceuta

Abstract: The coastal line of Ceuta is more than 25 km length, where a great amount of population is placed. Along this coast many geological processes have been described and imply a great threat for both human and infrastructure. The aim of this work is to analyse these processes by means of geological hazard mapping focused on flooding and flash flood, landslide and rock fall, storms, tsunamis and sea-level rise. These maps are valuable tools to predict and reduce the response-time with respect to catastrophic natural processes and territorial management. Although approximately only 15% of the Ceuta territory is exposed, more than 70% of its coastal area is exposed to geological hazards. Zones of higher hazard are located where several -high to very high degree- hazard processes could take place even simultaneously. This scenario is mainly found in relatively flat coastal sectors but attached to steep zones, where stream mouths and gorges are placed and display a strong seasonal behaviour.

Key words: mapping, geological hazards, landslides, flash flood, coastal processes, Ceuta

Abad, M., López-González, N., Delgado, J., Rodríguez-Vidal, J., Chamorro, S., Cáceres, L.M. y Ruiz, F. (2010): Análisis y cartografía de peligrosidad geológica en el litoral de Ceuta. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 23 (1-2): 37-55

Los mapas de peligrosidad y riesgo han demostrado ser una herramienta útil para pronosticar y disminuir el tiempo de respuesta respecto a los procesos naturales catastróficos. En 1972 el Grupo de Trabajo para el estudio estadístico de desastres Naturales (UNESCO, 1972) identificó el concepto de riesgo como la expectativa de que se produzca una pérdida, bien en forma de vidas humanas, bienes naturales o capacidad productiva. El riesgo (R) se evalúa como el producto de 3 factores en términos matemáticos: valor, vulnerabilidad y peligrosidad ($Riesgo = valor \times vulnerabilidad \times peligrosidad$) (Ayala, 1987; Felpeto, 1996). Se entiende por peligrosidad la probabilidad de que un punto se vea afectado por el peligro considerado a lo largo de un intervalo de tiempo. La vulnerabilidad es la expectativa de daño o pérdida inflingida a un elemento expuesto al peligro. El valor representa la cuantificación, en términos de vidas humanas, de coste, etc. de los elementos susceptibles de ser afectados por un peligro considerado.

A pesar de que las disciplinas que los estudian han avanzado mucho en los últimos años, los eventos de naturaleza geológica que implican riesgos potenciales para la sociedad se caracterizan por su difícil predicción y por sus graves consecuencias aunque, con toda seguridad, el factor más peligroso es el grado de desconocimiento que existe sobre este tipo de riesgos. En este trabajo se exponen algunos aspectos importantes relativos a los procesos geológicos más comunes que conllevan peligrosidad en el territorio que abarca el litoral de la Ciudad Autónoma de Ceuta.

El objetivo principal de este estudio es la determinación de la vulnerabilidad y de varias categorías de peligro (avenidas e inundaciones; deslizamientos y caída de rocas; temporales, ascenso del nivel del mar y tsunamis) en Ceuta mediante la utilización conjunta de sistemas de información geográfica y técnicas cartográficas clásicas.

Área de estudio

Ceuta está situada en el extremo noroccidental del continente africano y ocupa parte de la Península Tingitana, separada por unos 21 km de las costas europeas de Cádiz a través de la barrera natural entre dos masas de agua -el Mar Mediterráneo y el Océano Atlántico- que constituye el Estrecho de Gibraltar (Fig. 1). Esta ubicación geográfica le proporciona un elevado interés geoestratégico: se encuentra entre dos continentes, África y Europa, y entre dos mares, el Océano Atlántico y el Mar Mediterráneo. La ciudad cuenta con más de 75.000 habitantes (INE, 2008) y presenta una superficie de 18,5 km², con un perímetro de 28 km. El Istmo es un pequeño rectángulo con una suave pendiente en dirección N-S donde se asienta el núcleo urbano. La Península de Almina, al Este, coronada por el promontorio del Monte Hacho (195 m), es un conjunto de colinas con cuevas suaves hacia el norte y un brusco acantilado hacia el sur. El Campo Exterior, al Oeste, es la parte más continental de Ceuta, constituida por las estribaciones de la Sierra de Bullones, que configura un gran triángulo con vértice en el Istmo y base sobre Marruecos, con una complicada topografía de colinas disectadas por una

red de barrancos. En esta zona, se encuentran las máximas alturas de la ciudad (Monte Anyera, 345 m; Monte del Renegado, 239 m).

El clima de Ceuta es mediterráneo, con veranos calurosos e inviernos cortos y suaves. La temperatura media anual es de 16,6 °C. Las precipitaciones muestran la irregularidad anual e interanual típica del clima mediterráneo, aunque la influencia atlántica se hace patente en la mayor cantidad de precipitación recibida, superando los 835 mm/año. Los valores máximos se dan en invierno y los mínimos en julio y agosto, en los que las lluvias son prácticamente nulas (Fuente: *The Weather Channel Interactive*, 2009).

El conjunto de relieves accidentados y las pendientes acusadas en una superficie tan reducida, junto con las características climáticas, dan como resultado una red hidrográfica formada por numerosos barrancos de escasa longitud y marcado carácter torrencial y estacional. La costa norte ceutí es de carácter accidentado, con numerosos entrantes y salientes de escasas dimensiones, con el predominio de acantilados o fuertes inclinaciones hacia el mar. La costa mediterránea ceutí está representada por playas de textura grosera, estrechas y de corto recorrido, que continúan hacia el territorio marroquí ampliando su longitud y anchura.

El régimen hidrodinámico de esta costa está condicionado por el oleaje y, en menor medida, por las mareas. Más del 60% del oleaje es inferior a 0,5 m (Benavente *et al.*, 2007), con una altura máxima registrada de 5,5 m (LPEE, 1987) en épocas de tempestades. La onda de marea, procedente del Atlántico, entra en el Mediterráneo propagándose progresivamente hacia el este. El rango mareal varía desde unos centímetros, durante las mareas muertas, hasta 0,8-1,0 m durante las mareas vivas (Jaaidi *et al.*, 1992), lo que define a este tramo costero como micromareal de régimen semidiurno (Davies, 1964). Según la clasificación de Hayes (1979) se trataría una costa dominada por el oleaje.

Síntesis Geológica

Ceuta está asentada sobre la complicada geología del arco Bético-Rifeño, zona de convergencia de las placas tectónicas euroasiática y africana, donde se han descrito diferentes unidades estructurales (Sánchez-Gómez *et al.*, 2004), entre las que dominan las de origen metamórfico. El resultado morfológico son tres espacios de distinta topografía: el Istmo, la Península de Almina y el Campo Exterior. A continuación se hace un resumen de las principales características de cada unidad (Chamorro y Nieto, 1989) (Fig. 2):

Unidad del Hacho. Ocupa todo el Monte Hacho, al este de Ceuta (Fig. 2), y presenta una extensión de 2,2 Km². Está formada principalmente por gneiss, con bancos de calizas y diques de feldspatos (Fig. 3A). Constituye una formación homogénea y masiva, ya que la foliación se encuentra mal desarrollada. Las pocas medidas tomadas denotan una dirección media próxima a N55°E/40°NE, en la vertiente norte del Monte Hacho, y N120°E/45°SO en la Barriada del Sarchal en su ladera meridional. Los gneiss se encuentran afectados

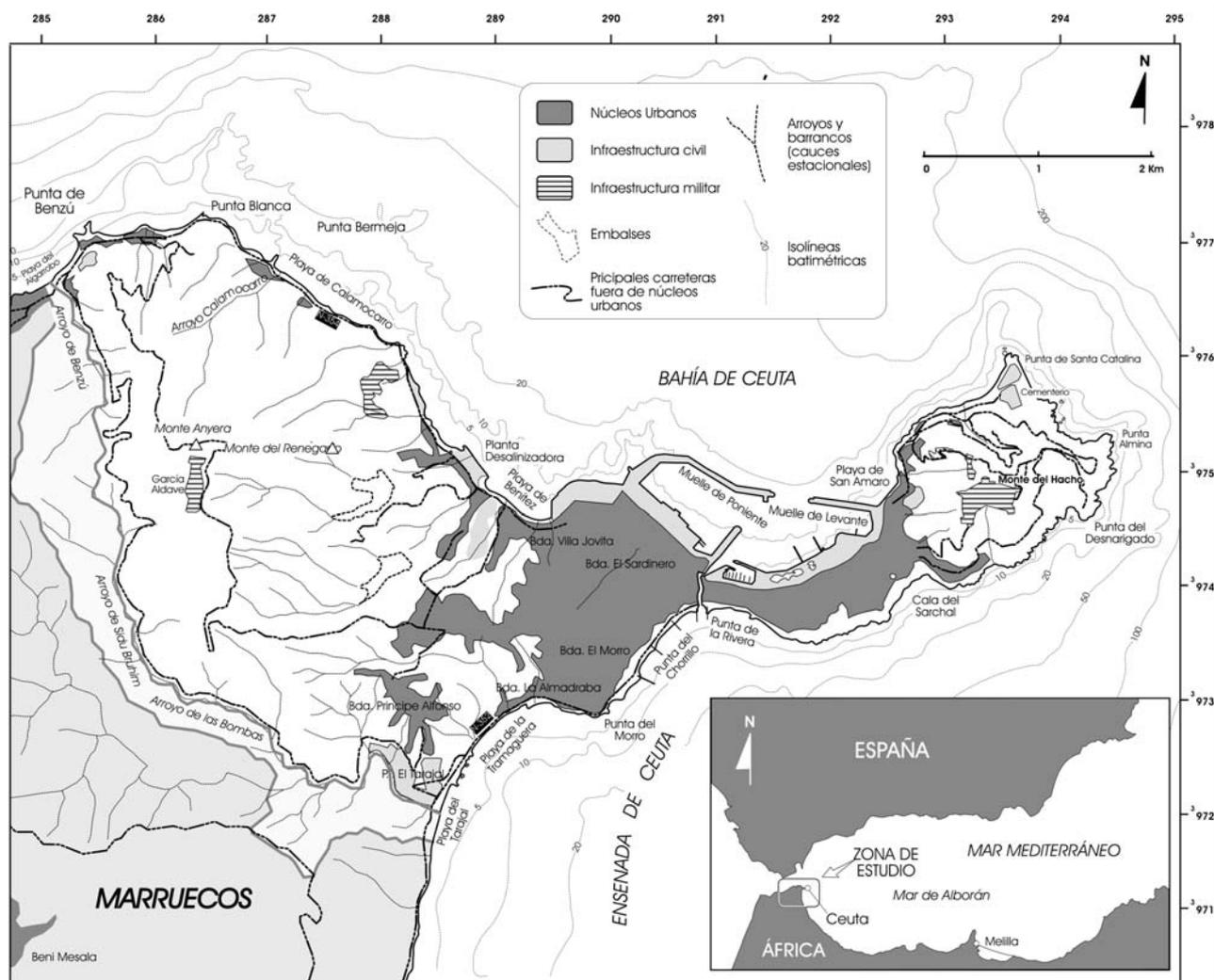


Figura 1.- Localización de la ciudad de Ceuta y distribución de los principales núcleos urbanos e infraestructuras civiles y militares. Escala 1:25.000.

principalmente por dos sistemas de diaclasas, muy bien representados, de dirección N96°E y N16°E, con buzamientos de 70°N y subverticales, respectivamente.

En conjunto la mayor parte de los planos de fractura han sido descritos en la ladera sur del monte Hacho, ya que en la ladera Norte las rocas se encuentran más alteradas y cubiertas por un manto edáfico bien desarrollado. Por otro lado, en esta unidad se observan al menos dos familias de fallas. La primera presenta una dirección N85°E y movimientos de desgarre, con un sistema de fallas conjugadas de dirección N155°E. La segunda familia presenta una dirección N20°E con otro sistema de fallas conjugadas de dirección N120°E y buzamiento subvertical.

Unidad del Istmo. Formada por gneiss y micaesquistos, que afloran en la casi totalidad de la superficie del Istmo (Fig. 2). En su mayor parte, están constituidos por gneiss bandeados, muy heterogéneos, e intensamente deformados, con desarrollo pobre de la foliación (Fig. 3B). Las rocas presentan un sistema de diaclasas que produce su individualización en bloques paralelepípedos. Además de los gneiss, esta unidad comprende micaesquistos que aparecen sobre los

primeros o se relacionan lateralmente con los mismos. La unidad presenta una foliación con dirección N50°E/38°NO y fallas normales de dirección N165°E y N115°E. Las primeras, mejor representadas, poseen buzamientos medios de 60° hacia el oeste. Las fracturas con dirección N115°E están peor representadas y buzamos 65° hacia el norte. Esta serie se apoya, en aparente concordancia, sobre las peridotitas del Sarchall, que se encuentran en su mayoría transformadas en serpentina.

Unidad de las Puertas del Campo. Está formada por pizarras de color gris oscuro y negras (Fig. 3C). La serie intercala bancos de cuarcitas negras de poca potencia. La unidad, que aflora en algo más de medio kilómetro cuadrado en el sector central de la ciudad (Fig. 2), presenta una estructuración tectónica compleja, con dirección N120°E/25°NE. Dada su naturaleza litológica, intensa fracturación y elevada permeabilidad, cuando aflora en laderas con pendientes pronunciadas experimenta frecuentemente movimientos gravitacionales.

Unidad del Sinclinal de Hadu-Findeq. Con casi 10 km² de extensión, esta unidad es la que aflora con mayor superficie en Ceuta y es, por tanto, la que posee mayor importancia (Fig. 2).

Está formada por un grupo heterogéneo de materiales sedimentarios. En su conjunto, se presenta como un sinclinal complejo, con su plano axial buzando al oeste y una ligera inmersión hacia el norte. El sinclinal es claramente asimétrico, presentándose gran parte de los materiales del flanco occidental invertidos. La serie sedimentaria comienza con una potente serie de calizas alabeadas alternantes con niveles de esquistos y pizarras con foliación muy bien desarrollada (Fig. 3D). Frecuentemente se encuentran afectadas por un diaclasado bien desarrollado y presentan elevada permeabilidad. Poseen un plegamiento suave, de elevado radio de curvatura, sobreimpuesto en varias direcciones. En el flanco oriental del sinclinal, las calizas se presentan en secuencia normal con dirección N/NE-S/SO y buzamiento variable. En el flanco occidental la estratificación se encuentra invertida, con direcciones cercanas a N-S y buzamientos de 45°O. La presencia de estas calizas genera en el relieve importantes resaltes. Los sistemas de fallas poseen direcciones medias de N10°E a N25°E.

Sobre las calizas alabeadas aflora una alternancia de esquistos y de areniscas carboníferas. La dirección y buzamiento de esta serie esquistoso-arenosa es similar a la de las calizas alabeadas. Encima de las anteriores, mediante una clara discordancia erosiva y en el núcleo del sinclinal, aparecen conglomerados, areniscas y argilitas rojas permo-triásicas con una alta complejidad estructural. Los materiales afloran en dos bandas paralelas con disposición NNE-SSO (Fig. 2). Coronan

la serie argilitas y, finalmente, bancos de arenisca masivos de composición cuarcítica. La presencia de arcillas en esta formación hace que ésta sea impermeable y, al mismo tiempo, puede generar problemas de deslizamientos en cimentaciones. Superpuestas a los materiales que conforman el sinclinal de Hadu-Fnideq aparecen discordantes dos superficies de 0,7 Km² de margas y areniscas calcáreas de edad Eoceno. A nivel geotécnico, estos materiales pueden ser problemáticos para la construcción debido a su escasa potencia en algunas zonas y a la posibilidad de que aparezcan infrayacentes las argilitas pérmicas.

Unidad de Isabel II. Aflora en una banda estrecha y discontinua de dirección N/NO – S/SO (Fig. 2). La superficie total que ocupa es de unos 0,9 km². Son esquistos y litoarenitas que se encuentran pellizcadas entre fallas por la Unidad de Beni-Mesala, por el Oeste, y la de Hadu-Fnideq, por el Este. Los materiales se encuentran muy deformados, sin poseer una dirección y buzamiento constante, aunque en la costa norte tienden a buzarse 25° hacia el NE con dirección N130°E.

Unidad de Beni Mesala. Aflora sólo en el sector occidental de Ceuta (Fig. 2). Está formada por filitas sedosas, barras de cuarcita de varios metros de potencia (Fig. 3E-F), una serie alternante de esquistos y cuarcitas, y potentes bancos de dolomías y calizas (Fig. 3G). En conjunto, estos materiales ocupan algo más de 6 Km², siendo las filitas los

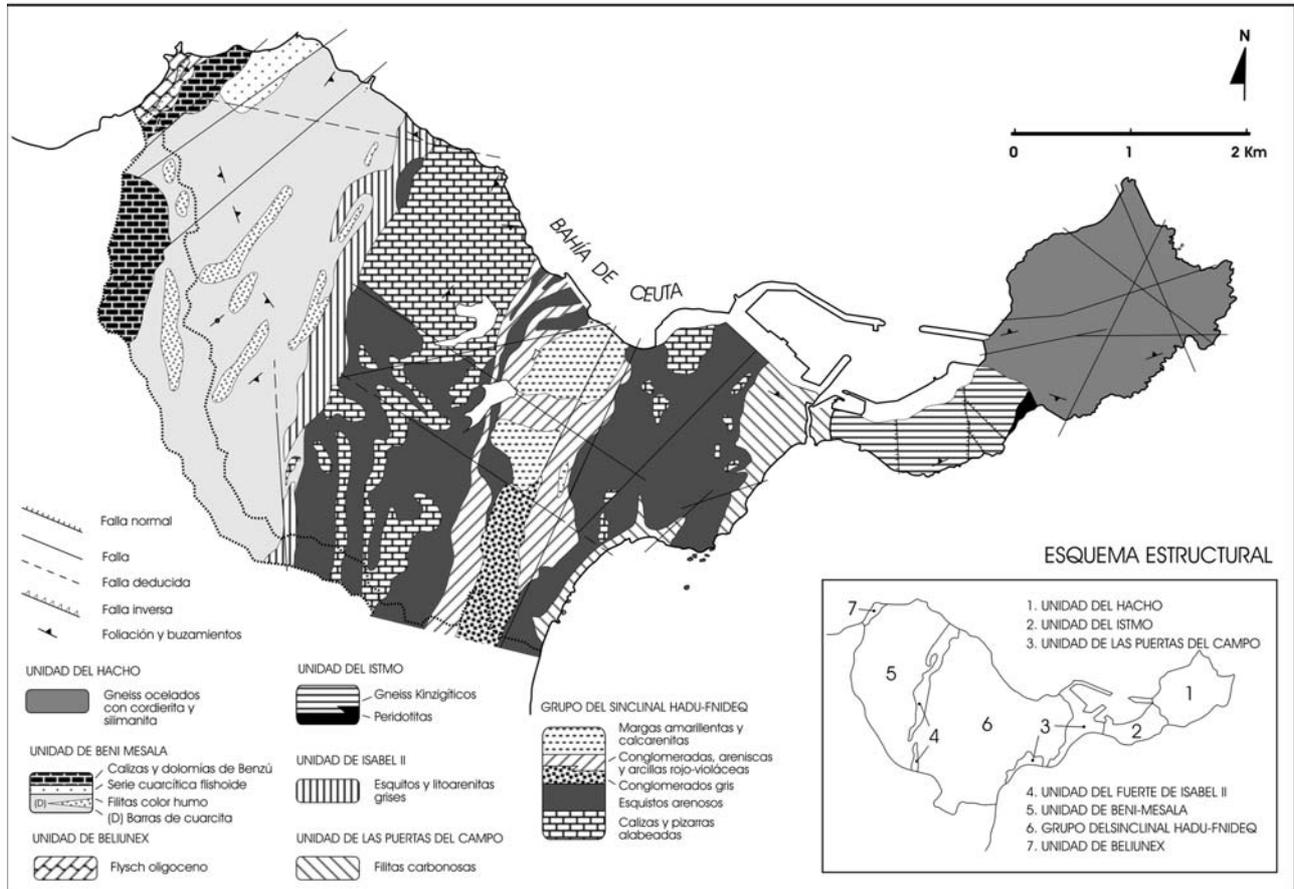


Figura 2.- Cartografía geológica simplificada de la Ciudad Autónoma de Ceuta (modificado de Chamorro y Nieto, 1989). Escala 1:25.000.

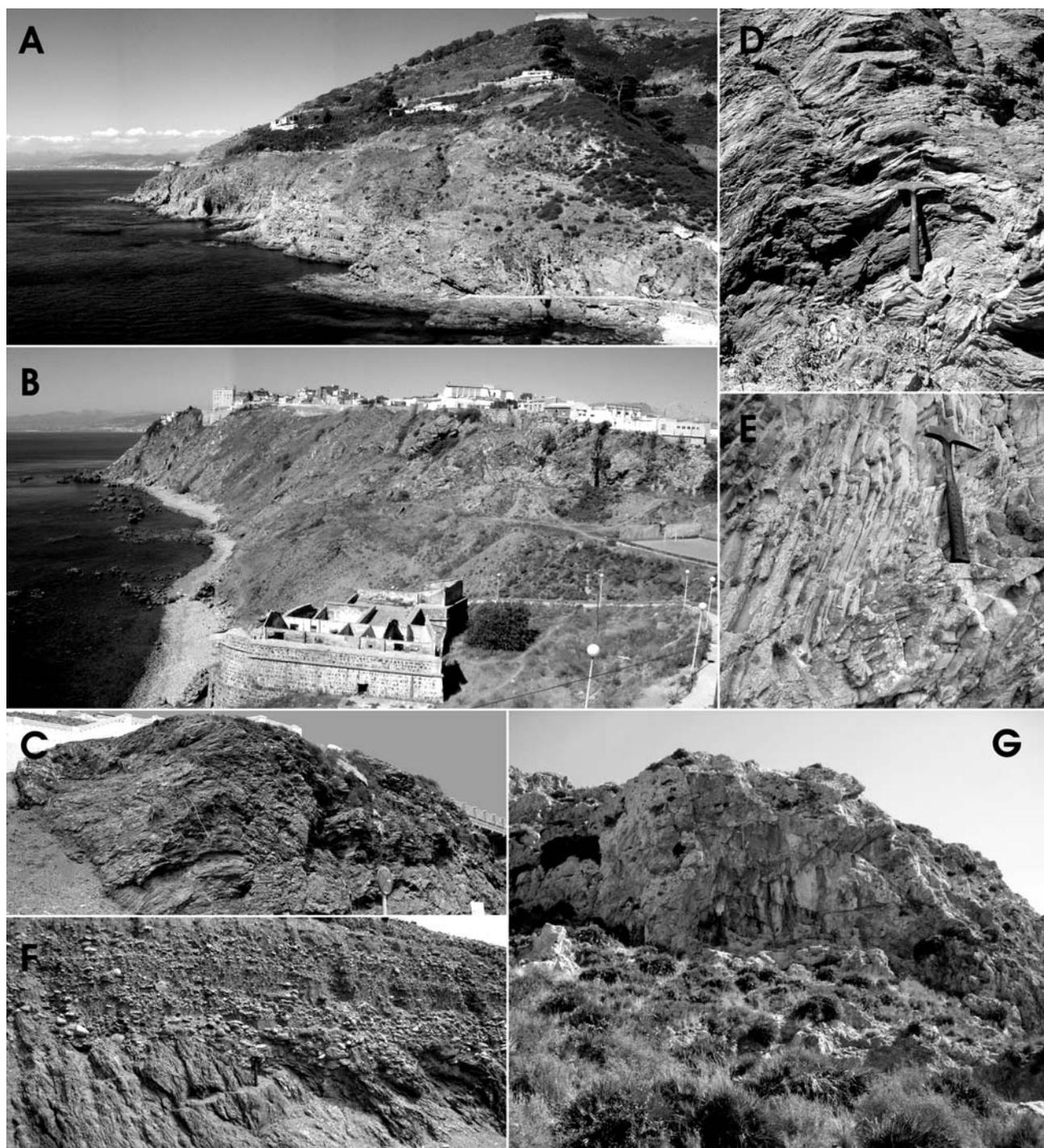


Figura 3.- Unidades geológicas de Ceuta. **A)** Gneiss en la Punta del Desnarigado en la Unidad del Hacho. **B)** Peridotitas y gneiss de la Unidad del Istmo en la Playa de Sarchall. **C)** Pizarras carbonosas de la Unidad de las Puertas del Campo en el Chorrillo. **D)** Calizas y pizarras alabeadas de la Unidad Hadu-Fnideq cerca de Playa Benitez. **E)** y **F)** Cuarzitas plegadas y filitas color humo de la Unidad Beni-Mesala en Punta Cabeza. **G)** Dolomías y calizas de la Unidad Beni-Mesala en Benzú.

materiales más abundantes. Aunque en la zona sur la serie presenta una disposición anticlinal compleja, en el Norte la estratificación se mantiene constante con ligeras variaciones en la dirección NE-SO y buzamientos de 45° al SE. Entre los múltiples sistemas de fallas, el mejor desarrollado es el de dirección $N40^\circ E$.

Unidad de Beliuex. Ocupa sólo unos 62.000 m^2 y aflora en el extremo noroccidental del territorio de Ceuta (Fig. 2). Esta unidad flyshoide oligocena, formada por una

alternancia de areniscas y lutitas, se apoya mediante un contacto mecánico en las dolomías de Beni Mesala. La estratificación de estos materiales está bien marcada y presenta una dirección y buzamiento de $N55^\circ E/60^\circ S$.

Metodología

Consideraciones previas

En este trabajo se han elaborado diferentes mapas de peligrosidad de i) avenidas e inundaciones fluviales;

ii) deslizamientos y caída de rocas y; iii) temporales, tsunamis y ascenso del nivel del mar, a partir de varios mapas de parámetros. La combinación de estos tres mapas se ha utilizado para fabricar un mapa cualitativo de peligrosidad conjunta.

Dada la multitud de parámetros considerados, la elaboración de mapas de peligrosidad es un proceso parcialmente arbitrario ya que los criterios utilizados para la identificación y caracterización de un proceso natural son, hasta cierto punto, subjetivos. Esto necesariamente no implica una incorrecta determinación de los mismos, aunque sí puede conllevar una importante variabilidad en el área que se considera afectada.

La principal dificultad metodológica es combinar los datos a partir de los que se elaboran los mapas de cada proceso, o de estos últimos con otros mapas en los que se consideran los posibles elementos e infraestructuras potencialmente afectados por los procesos geológicos peligrosos (por ejemplo, un mapa de vulnerabilidad y de riesgos geológicos). Existe una gran diversidad de procedimientos (por ejemplo, Bosque Sendra *et al.*, 2000) para llevar a cabo esta función y cada uno de ellos proporciona un resultado diferente. De entre ellos se ha considerado prioritario obtener el *mapa de peligrosidad total* o de *exposición a amenazas* a partir de la combinación de los diferentes mapas de peligrosidad (por ejemplo, Roca *et al.*, 2006).

La superposición de cartografías y tratamiento de datos para obtener cada uno de los mapas de peligrosidad se ha llevado a cabo mediante diferentes sistemas de información geográfica (*ArcGis 9.2* y *Global Mapper 8*) a partir de los que se han combinado y superpuesto mapas de datos -o capas- sobre una base cartográfica geográfica. Estos mapas constructores están formados por áreas -o polígonos- a los que se les asigna un determinado valor. El resultado final es una cartografía o mapa formado, a su vez, por distintos polígonos a los que se le asigna un nivel de peligrosidad (nula-baja, media y alta) en función de los parámetros y frecuencia estimados, que definen el proceso geológico considerado individualmente.

La metodología empleada para la elaboración del mapa de peligrosidad total es similar, mediante combinación de polígonos de diferente valor de peligrosidad de cada uno de los mapas de peligrosidad de cada proceso geológico considerado. En total, se han diferenciado siete rangos de peligrosidad, desde muy alta a muy baja. Una explicación metodológica más amplia puede consultarse en Abad *et al.* (2008).

Datos de partida

Los datos de partida poseen una gran importancia en la elaboración de este tipo de cartografías temáticas, ya que el resultado final suele ser tan bueno, o tan malo, como la calidad de las referencias utilizadas. Los materiales de partida han sido los siguientes: i) mapa topográfico nacional de Ceuta a escala 1:25.000 del Instituto Español de Cartografía (isolíneas de nivel cada 10 m); ii) mapa topográfico a escala 1:5.000 en formato digital editado por el Ayuntamiento de Ceuta (isolíneas de nivel cada 2 m); iii) mapa geológico, de pendientes para usos agrarios y para actividades

urbanas de Ceuta y de clasificación de cuencas de Ceuta según su densidad de drenaje a escala 1:25.000 (Chamorro y Nieto, 1989); iv) juego de fotografías aéreas a color del año 1987, a escala 1:5.000 y; v) juego de fotografías aéreas, en blanco y negro y color del año 1995, a escala 1:25.000 (Centro Cartográfico y Fotográfico del Ejército del Aire).

Los datos de distribución de precipitaciones y temperaturas se han obtenido de la consulta de diferentes publicaciones científicas, en los que se incluyen series temporales detalladas entre los años 1942 y 1995 (Chamorro y Nieto, 1989; García-López, 1992). Estas series han sido contrastadas con datos más recientes (de 1990 a 2005) procedentes de la Agencia Estatal de Meteorología (estación meteorológica nº 603200) y diferentes sitios web donde se ofrece una información climática muy completa de las últimas décadas.

Vulnerabilidad

La vulnerabilidad o susceptibilidad es el grado de pérdida como resultado de la ocurrencia de un fenómeno geológico o la expectativa de daño sobre un determinado elemento expuesto (Ayala, 1987), principalmente referido a población humana, actividades e infraestructuras. En muchas otras ocasiones el concepto de vulnerabilidad atiende también a la fragilidad del medio natural (Varnes, 1984), es decir, de zonas no urbanizadas. En este trabajo, y con el propósito de facilitar la metodología empleada y la representación de los datos, se ha decidido integrar el área de actuación y la frecuencia de los procesos peligrosos, que afectan tanto al medio natural como al ocupado por el ser humano, dentro de los mapas de peligrosidad (ver punto siguiente).

Por otro lado, las zonas urbanizadas, o de uso antrópico, que pueden ser potencialmente dañadas por procesos geológicos, se han incluido dentro de un mapa de vulnerabilidad simplificado donde se muestran las áreas ocupadas por el hombre que pueden experimentar daños potenciales (Fig. 1). De esta forma, y en base a los mapas topográficos a escala 1:5000 y 1:25.000, se han delimitado zonas potencialmente vulnerables y zonas que no lo son, entendiendo las primeras como los núcleos de población principal, las infraestructuras civiles y militares, y las carreteras más importantes de la región. Su utilidad es básicamente descriptiva y complementaria a los mapas de peligrosidad, ya que el objetivo de este trabajo no es delimitar zonas con diferente grado de vulnerabilidad en Ceuta, sino detallar con la mayor precisión posible áreas susceptibles de albergar procesos peligrosos.

Mapas de Peligrosidad

La peligrosidad es la probabilidad de que un lugar, durante un intervalo de tiempo determinado, sea afectado por un evento potencialmente perjudicial (Ayala, 1987). En el caso de la ciudad de Ceuta, los mapas de peligrosidad se han elaborado con el objetivo de prever procesos que actúan principalmente a medio

y largo plazo. Esto no significa que dichos mapas puedan ser utilizados de forma puntual para detectar zonas susceptibles de sufrir desastres naturales a diferente escala. La caracterización de cada proceso potencialmente peligroso se ha llevado a cabo desde un punto de vista estrictamente descriptivo y cualitativo, es decir, dependiente de capas de información espacial, sin establecer un cálculo preciso –aunque sí aproximado– de la probabilidad de ocurrencia temporal de estos fenómenos.

Mapa de Peligrosidad de inundaciones y avenidas. Se han diferenciado diversos valores de peligrosidad considerando mapas de clasificación de cuencas por superficie y densidad de drenaje, de orografía de las cuencas fluviales, así como de permeabilidad y competencia de las litologías los arroyos y barrancos.

Mapa de Peligrosidad de deslizamientos y caída de rocas. El mapa de peligrosidad de este tipo de procesos se ha construido a partir del mapa topográfico, el mapa de pendientes y el mapa geológico de Ceuta a escala 1:25.000, donde se incluye la naturaleza litológica de cada unidad y medidas estructurales de buzamientos, foliación, diaclasas y fallas. A su vez, esta información se ha completado y mejorado con la obtención de datos mediante diferentes campañas de trabajo de campo con el objetivo de conocer las direcciones estructurales dominantes de las diferentes unidades geológicas en cada una de las zonas de la ciudad. Sólo en los sectores con una estructura geológica más compleja, y donde las condiciones de afloramiento lo han permitido, se ha establecido estaciones de

medición geomecánicas para un análisis más detallado de los procesos de deslizamientos y caída de rocas.

Mapa de Peligrosidad de temporales, tsunamis y ascenso del nivel del mar. Para la elaboración de este mapa se han utilizado los mapas topográficos de Ceuta a escala 1:25000 y 1:5000, en los que se especifican las isobatas más cercanas a la costa (5, 10 y 20 m). Además, se han considerado factores tales como la altura máxima del oleaje y la fuerza del viento durante los últimos temporales de invierno, el rango mareal medio y la orografía de la costa, junto con diferentes variables de tipo geomorfológico y antrópico.

Mapa de Peligrosidad Total o de Exposición. Este tipo de mapas se construyen a través de la superposición de los diferentes mapas de peligrosidad (Fig. 4). Las zonas de peligrosidad total muy alta se han definido donde confluyen dos o tres áreas de peligrosidad alta en relación a los diferentes tipos de procesos, mientras que las zonas de peligrosidad total alta son aquéllas en las que sólo se ha podido definir una clase de peligrosidad alta, independientemente de que también coincidan con otros tipos de peligrosidad de menor grado. Las zonas de peligrosidad media-alta total se han delimitado en aquellos sectores donde coinciden dos o tres áreas de peligrosidad media, mientras que las de peligrosidad media total se localizan donde se superponen una única zona de peligrosidad media y dos zonas de peligrosidad baja o menor. Por último, las zonas de peligrosidad media-baja se ha establecido donde confluyen dos o tres áreas de baja peligrosidad y las de peligrosidad baja y de peligrosidad muy baja se definen en zonas afectadas por un único tipo de peligrosidad baja o ninguno, respectivamente.

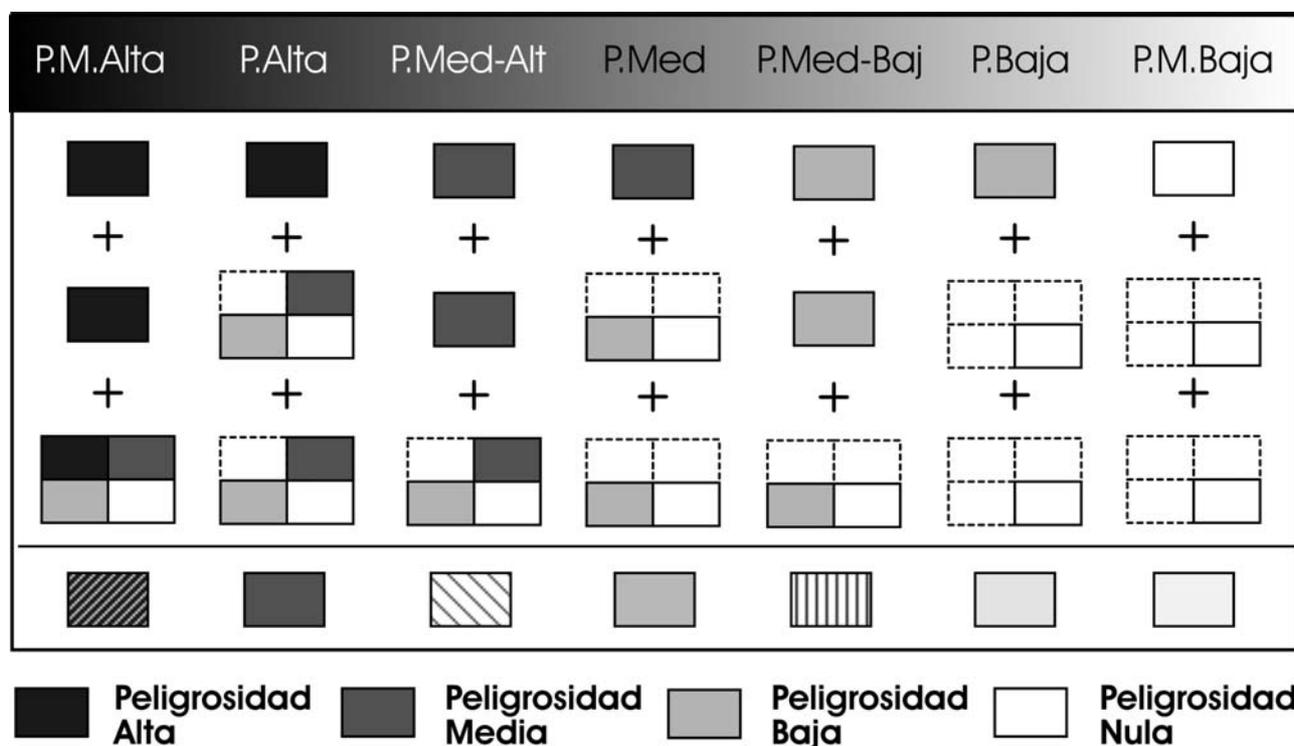


Figura 4.- Matriz elaborada para la definición de diferentes grados de peligrosidad total a partir de los diferentes tipos de procesos considerados. P.M. Alta: Peligrosidad muy alta; P. Alta: Peligrosidad Alta; P. Med-Alt: Peligrosidad media-alta; P.Med: Peligrosidad media; P.Med-Baja: Peligrosidad media-baja; P.Baja: Peligrosidad baja; P.M.Baja: Peligrosidad muy baja.

Peligrosidad

Un aspecto importante a destacar en estos mapas es el grado de incertidumbre que llegan a representar los valores cartografiados. Es necesario asumir que, ya sea por los posibles errores en los mapas utilizados como fuentes de información o por las posibles insuficiencias de la metodología empleada para su elaboración, es difícil establecer su nivel de resolución.

Inundaciones y avenidas fluviales

El objetivo prioritario de este mapa es localizar aquellas zonas que tienen mayor probabilidad de sufrir avenidas e inundaciones fluviales. Estos procesos generalmente están ligados directamente a uno o varios de los siguientes factores: i) desbordamientos naturales del agua de los cauces durante momentos de precipitaciones muy intensas; ii) encharcamientos en zonas llanas, mal drenadas y de sustrato impermeable; iii) presencia de obras públicas, como carreteras, canales de riego y edificaciones, que reducen el caudal máximo que es capaz de evacuar un cauce sin desbordar, o que bien reducen la capacidad drenante de llanuras de inundación en momentos críticos; iv) zonas de desembocadura de ríos, arroyos y barrancos cuyo drenaje se dificulta por algún tipo de obstáculo natural (por ejemplo, un deslizamiento) o de origen antrópico.

En función de sus características dinámicas existen varios tipos de procesos de avenidas e inundaciones que dependen, muchas veces, de las particularidades del relieve y de la configuración geológica y geomorfológica de la cuenca. En Ceuta, el tipo de fenómeno mejor representado y más frecuente es el que se denomina «creciente con alta energía de escorrentía», relacionado con las precipitaciones torrenciales de invierno. Estas crecientes, con alta energía cinética y alto poder erosivo, son procesos muy comunes en áreas escarpadas y de dominio montañoso, en cuencas hidrográficas que permiten una rápida concentración de las aguas y altos valores de caudal.

La principal característica de estas tormentas no es el volumen total de precipitaciones, sino que pueden llegar a registrarse precipitaciones muy intensas en pocas horas que constituyen más de la mitad de la precipitación anual. Son fenómenos, rápidos y catastróficos, que originan cuantiosos daños directos e indirectos, ya que vienen acompañados por deslizamientos y oleaje de gran altura en las costas. Durante los momentos de precipitaciones torrenciales a lo largo de cursos de agua, en valles encajados y con escaso desarrollo de llanuras de inundación, las crecientes violentas y con alta velocidad de escurrimiento pueden producir fuerzas hidrodinámicas capaces de causar daños, destruyendo viviendas situadas en el lecho menor. Estos daños se producen por acción directa de las aguas, por erosión y consecuente solapamiento de las márgenes de los ríos; o por inundaciones aguas abajo de los arroyos cuando estos drenan a zonas endorreicas o con deficiente desagüe hacia el mar.

Las lluvias intensas de carácter torrencial aparecen en la costa mediterránea española en otoño-invierno bajo condiciones de advección del Este, donde la

recarga de humedad se produce cuando aire continental frío de origen marítimo polar o continental polar, procedente del norte, pasa sobre el mar Mediterráneo más caliente (Millán *et al.*, 1995). Este proceso, conocido como frente frío de retroceso (*back-door cold front*) (Huschke, 1959; Bluestein, 1993), puede reforzarse con la llegada de un goteo de aire frío en altura y/o con la formación de un sistema de bajas presiones sobre el norte de África. En muchos casos, la interacción de diferentes frentes fríos y calidos sobre Ceuta favorece la generación de tormentas estacionarias que se van regenerando constantemente y dan lugar al encadenamiento de varios días con episodios de precipitaciones torrenciales sobre su territorio.

Aunque de forma puntual en Ceuta se han registrado este tipo de fenómenos meteorológicos en verano, casi siempre suelen producirse en otoño e invierno, principalmente de Noviembre a Enero (Fig. 5). Es entre estos meses cuando se concentran las precipitaciones en la ciudad, siempre acompañados por lluvias torrenciales que contribuyen en más del 75% al total de la precipitación anual (al menos de 80 l/m² y día). En otras muchas ocasiones estas precipitaciones, aunque de menor intensidad, pueden causar importantes daños, siempre y cuando se concentren en pocas horas y vengan precedidas de prologados periodos de relativa sequía o, por el contrario, se produzcan semanas después de precipitaciones continuadas y no necesariamente torrenciales. Estos son los casos de los fenómenos registrados de septiembre de 2007 y diciembre de 2001 y 2004, en que lluvias inferiores a 50 l/m² causaron graves daños e inundaciones en la ciudad (Fig. 5).

El análisis estadístico superficial de los datos entre 1995 y 2008 denota la existencia media de casi dos fenómenos de grandes borrascas de invierno, acompañado por lluvias torrenciales, con precipitaciones superiores a 100 l/m² día cada año (Fig. 5). Constituyen, por tanto, un proceso de gran peligrosidad para la región. A destacar la reciente tormenta otoñal del 27 al 29 de septiembre de 2008, en la se registraron más 300 mm de precipitación en menos de 72 horas, lo que ocasionó pérdidas valoradas en más de 3 millones de euros por el Ayuntamiento de la Ciudad (fuente: El Faro de Ceuta).

Mapa de Peligrosidad. Dentro de esta cartografía las zonas de peligrosidad alta son aquellas sufren inundaciones y llegada de avenidas prácticamente cada vez que se produce la llegada de tormentas a las costas del Estrecho. Se localizan próximas a las desembocaduras de los cauces en las que confluyen factores como una alta densidad de drenaje y superficie de las cuencas, una baja permeabilidad del sustrato y/o pendientes medias de moderadas a altas. Constituyen zonas de alta peligrosidad también los arroyos y barrancos que, aún teniendo pendientes moderadas o bajas y densidad baja de drenaje, desaguan hacia áreas deprimidas y endorreicas, sin desembocadura natural al mar (Fig. 6). Estas zonas suelen coincidir con núcleos urbanizados, donde el agua de escorrentía superficial tiene dificultad para infiltrarse en el subsuelo y el cauce se encuentra taponado por viviendas o cualquier otro tipo de construcción.

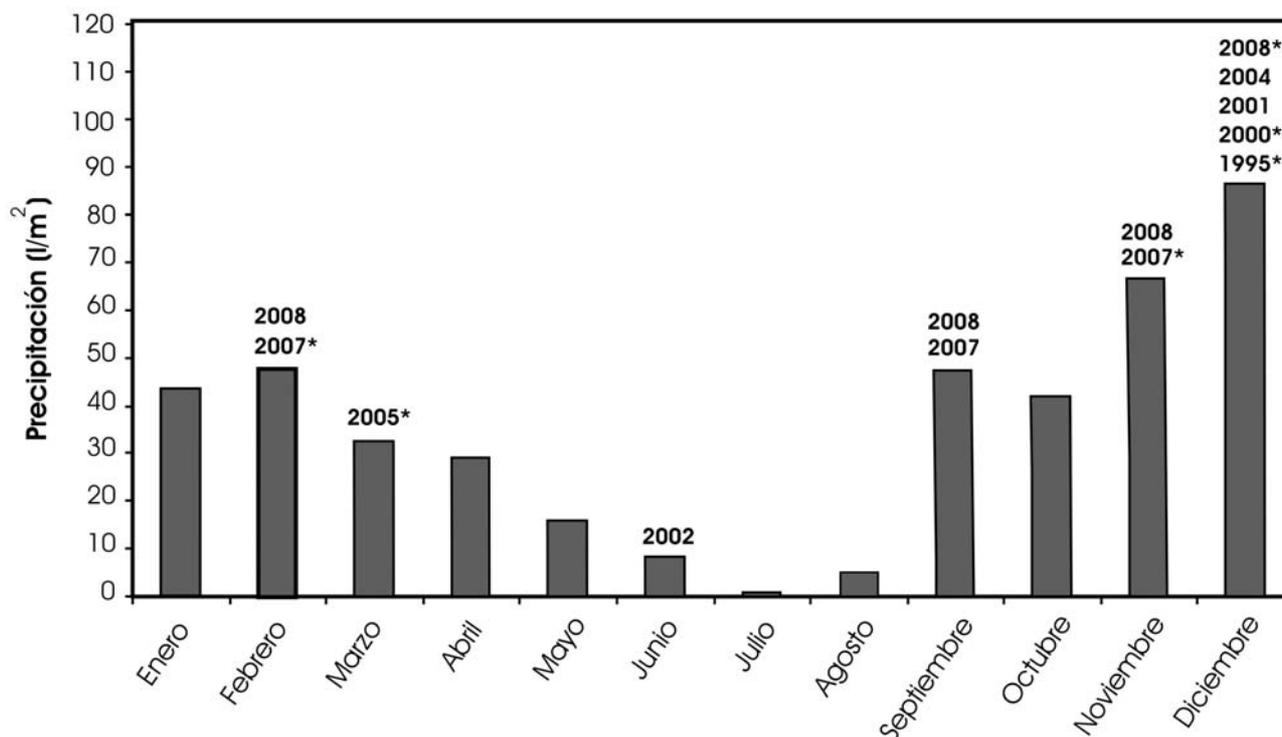


Figura 5.- Precipitación media distribuida por meses en Ceuta entre los años 1995 y 2008. Las fechas indican los meses en los que se produjeron lluvias torrenciales superiores a 100 l/m² o inundaciones en la ciudad. Lo asteriscos junto a la fecha indican la aparición en prensa local de deslizamientos en el litoral de Ceuta asociados a lluvias torrenciales.

La peligrosidad media se establece en áreas que experimentan este tipo de procesos sólo en momentos de precipitaciones extraordinarias en el tiempo (aproximadamente 1 fenómenos de este tipo cada 5 años), con lluvias torrenciales continuadas durante varios días. Este tipo de peligrosidad media se establece en áreas próximas a las desembocaduras, en cuencas de drenaje con baja permeabilidad del sustrato, superficie relativamente grande o mediana, densidad de drenaje media y pendientes fuertes. También se consideran zonas de peligrosidad media las áreas de confluencia de varios arroyos y barrancos cercanos al mar, de peligrosidad menor, así como las áreas inmediatamente contiguas a las zonas de peligrosidad alta. Estas últimas definen zonas de transición entre zonas de peligrosidad baja y alta.

Las zonas de peligrosidad baja, sometida a este tipo de procesos sólo en momentos excepcionales, se concentran a lo largo de la superficie de los valles de los arroyos y de los barrancos, independientemente de la densidad de drenaje, pendiente y litología de las cuencas. Estas zonas pueden actuar como áreas de canalización de pequeñas avenidas en momentos de grandes precipitaciones. De la misma forma, se han considerado zonas de baja peligrosidad los cauces cercanos a las desembocaduras, o áreas de expansión y deceleración de corrientes, adyacentes a las que se han clasificado previamente como zonas de peligrosidad alta o media. Finalmente, las zonas de peligrosidad nula o muy baja son aquellas que no cumplen las condiciones anteriores y que, generalmente, se localizan suficientemente alejadas de arroyos y barrancos en áreas de interfluvio.

Las tres únicas zonas de alta peligrosidad cartografiadas se localizan en las zonas de

desembocadura de los arroyos de las Bombas, del Sardinero y de Benítez (Fig. 6). La cuenca hidrográfica del Arroyo de las Bombas, localizada en el SO de la ciudad, constituye la de mayor extensión de la ciudad, circula por materiales muy fracturados de diferente competencia (filitas, esquistos, calizas y conglomerados) y presenta una frecuencia de drenaje alta y una densidad media. Por otro lado, el nacimiento de este río se produce a cotas elevadas dentro de la Sierra de Bullones y desciende muy rápido hacia el sureste, recogiendo progresivamente las aguas de sus afluentes. La densidad de drenaje de la cuenca experimenta un progresivo incremento aguas abajo, lo que puede producir un brusco aumento de su caudal, en épocas de precipitaciones, cerca de su zona de desembocadura en el Tarjal (A en Fig. 7). Es en esta zona donde se concentra la mayor peligrosidad de avenidas e inundaciones, ya que en ella se produce un cambio brusco de pendiente y un suavizado de la topografía, favoreciendo la desaceleración y expansión de las corrientes hídricas. Si a esta circunstancia le sumamos que la zona se encuentra ligeramente deprimida, la bajísima capacidad de infiltración de las aguas en este sector (completamente ocupado por almacenes, edificaciones y naves industriales) y un deficiente sistema de desagüe de los cauces, el resultado es un área con alta probabilidad de experimentar inundaciones en zonas situadas por debajo de los 5 metros de altura, sin necesidad de que existan precipitaciones muy intensas (Fig. 7A).

Otra zona de peligrosidad alta se ha delimitado en el área más próxima al mar del arroyo que circula por el Barrio del Sardinero, en la costa norte de la ciudad (B en Fig. 6). Se trata de un pequeño cauce de dirección NE – SO, poco encajado y de baja pendiente, de unos

100 m de ancho por 800 m de largo, sin barrancos importantes que lo alimenten y que no nace de una zona elevada que favorezca la aceleración de las corrientes aguas abajo. Su principal característica es que circula por zonas completamente urbanizadas, que han ocupado tanto parte de su canal natural como su pequeña llanura de inundación. Por otro lado, este arroyo transcurre en su totalidad por los esquistos arenosos carboníferos de la Unidad de Hadu-Fnideq, de muy baja permeabilidad, y su zona de desembocadura natural está ocupada por los terrenos ganados al mar de las zonas portuarias. Todas estas circunstancias confluyen para generar una superficie con muy altas probabilidades de experimentar inundaciones, a pesar de que las precipitaciones no sean muy intensas.

La última zona de peligrosidad alta descrita, se localiza en la desembocadura del Arroyo de Benítez, cerca de la playa con el mismo nombre (C en Fig. 6, Fig. 7B). En esta zona confluyen circunstancias muy similares a las descritas en el caso anterior. La cuenca de drenaje, que canaliza las aguas estacionales desde unos 75 metros de cota, es de mayor extensión y posee una mayor frecuencia de drenaje que la descrita con anterioridad, por lo que recoge un mayor volumen de agua y tiene un mayor caudal en épocas de lluvias. Además, otros arroyos y barrancos confluyen con él en la costa desde el este. Su peligrosidad por avenidas es,

por tanto, algo mayor que la anterior existiendo, al mismo tiempo, un peligro claro de inundación en las áreas planas o deprimidas próximas a su litoral.

Finalmente, existen también áreas de peligrosidad media de cierta relevancia en las zonas distales de cauces localizados en la parte noroeste de la ciudad (D en Fig. 6). Son las desembocaduras de los arroyos y barrancos de Benzú, Calamocarro y los contiguos a la planta desalinizadora. Todos poseen cuencas de superficies medias, pendiente de fuerte a muy fuerte (20-50%) y ramificaciones de tipo dendrítico bien desarrolladas sobre los materiales de la Unidad Beni-Mesala y Hadu-Fnideq.

Deslizamientos y caída de rocas

Dentro de los procesos geológicos ligados a los riesgos geodinámicos externos se encuadran los movimientos del terreno en general. Los procesos de ladera son los más extendidos dentro de los mismos, en parte debido a que no se asocian a un determinado tipo de litología y pueden ocurrir en infinidad de condiciones gran número de factores que influyen, condicionan y desencadenan estos movimientos.

Se han diferenciado dos grandes grupos de factores que definen y caracterizan los movimientos de laderas: los intrínsecos y los externos. Los factores

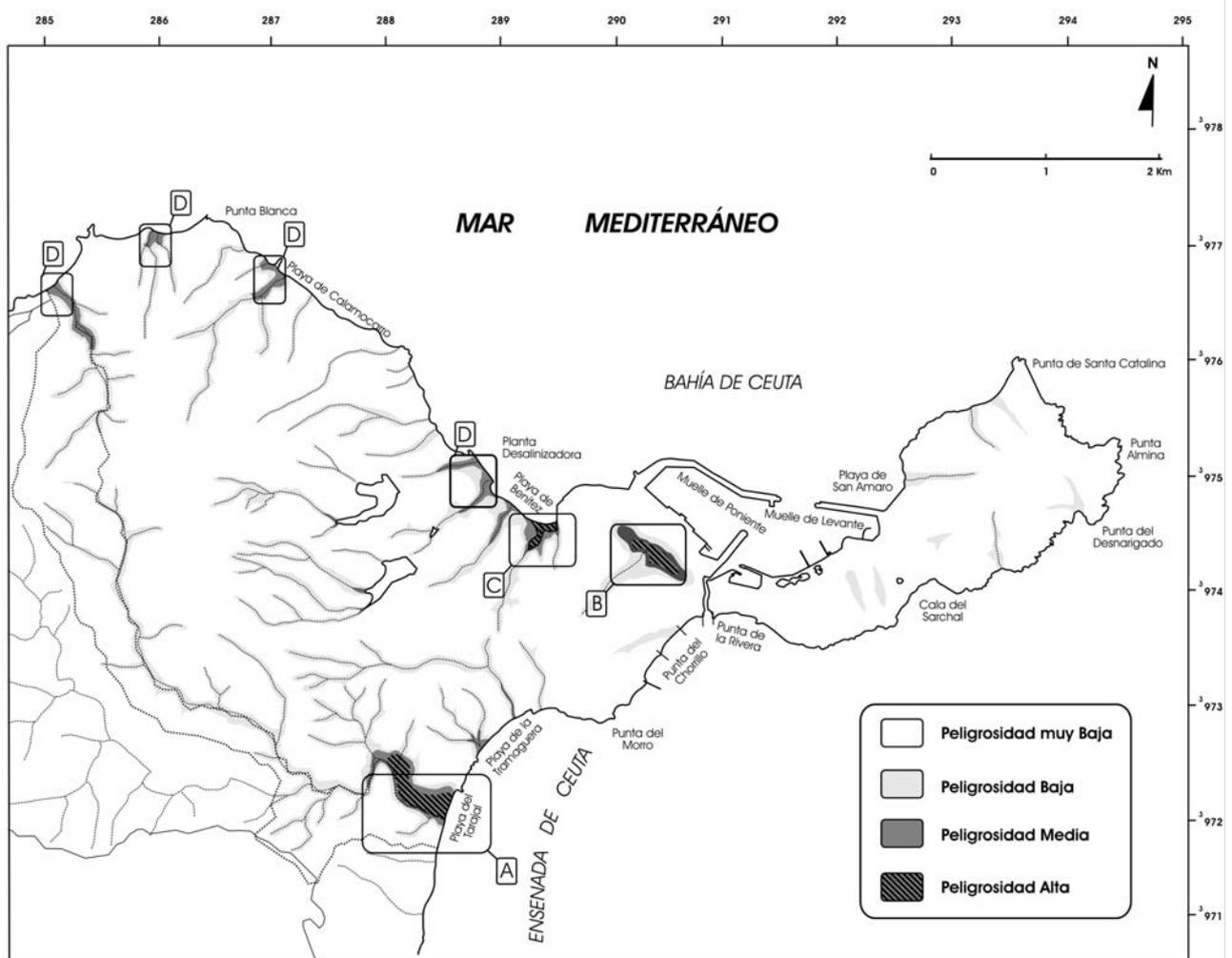


Figura 6.- Mapa de peligrosidad por avenidas e inundaciones de Ceuta a escala 1:25.000.

intrínsecos son la litología, la estructura, las propiedades físicas de los materiales, el comportamiento hidrogeológico, las propiedades geomecánicas, el estado de esfuerzos, etc. Los factores externos son aquéllos que actúan sobre el material dando lugar a modificaciones de estabilidad inicial de las laderas y taludes, como aplicación de cargas estáticas, movimientos sísmicos, factores climáticos, cambios en las condiciones hidrogeológicas, variaciones en la geometría del talud, etc. Es el segundo grupo de factores el que provoca o desencadena la inestabilidad de laderas y son responsables de la magnitud del proceso, mientras que es el primer grupo de factores el que controla los diferentes tipos, mecanismos y modelos de movimientos gravitacionales. El factor más importante es, obviamente, la propia morfología del terreno, aunque no debe ser necesariamente abrupta o muy accidentada. Otro factor fundamental es el agua infiltrada y el comportamiento hidrogeológico de los materiales. La correlación entre movimientos de ladera y periodos de lluvia es un hecho bien conocido en la ciudad de Ceuta, por ejemplo, en la carretera de Calamocarro a Benzú, al noroeste de la ciudad (Fig. 1).

En Ceuta los dos procesos de laderas dominantes son los deslizamientos y la caída de rocas. Dentro de los deslizamientos se pueden diferenciar dos tipos básicos, ambos identificados sobre el terreno: los traslacionales y los rotacionales. Los primeros ocurren a favor de planos de debilidad con dirección más o menos paralela a la superficie del talud e inclinación menor o igual a la pendiente del talud. Generalmente, una superficie de discontinuidad estructural o de materiales de diferente competencia sirve de plano de rotura. Los deslizamientos rotacionales son aquellos en los que la rotura ocurre a través de superficies curvas. Se trata de un movimiento que suele estar asociado a suelos y depósitos cohesivos, o a macizos rocosos muy fracturados y sin estructura. Resulta muy complicado establecer una periodicidad precisa para este tipo de procesos, en general muy frecuentes, que también sería muy variable en función del sector considerado. Sin embargo, a luz de la información recabada en la prensa local en los últimos 15 años (fuente: El Faro de Ceuta), existe una correlación evidente entre los periodos de grandes lluvias de otoño e invierno y los etapas en que se concentran los procesos de inestabilidad de laderas en el litoral de Ceuta (Fig. 5). Es muy probable que esta circunstancia se deba principalmente a la infiltración y saturación de agua en el subsuelo y a la acción erosiva del oleaje al pie de acantilados.

En base a la cartografía elaborada, las zonas de peligrosidad alta por deslizamientos y caída de rocas en Ceuta se han definido en áreas de pendientes muy escarpadas (>50%), formadas por sustratos rocosos con un importante desarrollo de uno o varios sistemas de planos de discontinuidad. Los planos de rotura buzan en la misma dirección que la pendiente y poseen una inclinación inferior a la misma, aunque suficientemente alta como para superar el ángulo de rozamiento. Otros factores considerados en cada unidad son la alternancia

de litologías de diferente competencia que favorezcan el deslizamiento entre bloques.

Las zonas de peligrosidad media se han descrito en zonas de pendientes fuertes a muy fuertes (20-50%), en rocas y suelos que cumplen las condiciones descritas en el supuesto anterior. Constituyen también zonas de peligrosidad media las zonas muy abruptas (>50% de pendiente), intensamente fracturadas, pero que sólo cumplan alguno de los parámetros descritos para zonas de peligrosidad alta, es decir, que los planos de rotura potenciales bucen en la misma dirección que la pendiente o que posean una inclinación inferior a la misma.

Las zonas de peligrosidad baja son aquellas de pendiente moderada (10-20%) y que cumplen las mismas condiciones descritas en los casos anteriores, o aquellas de pendientes fuertes a muy fuertes (20-50%) que cumplen algunas de ellas. Finalmente, las zonas de muy baja peligrosidad se describen en superficies de terreno de pendientes muy bajas (<20%), aunque pueden poseer características geológicas adecuadas para el desarrollo de procesos gravitacionales. Esto no significa que en ellas no sean posibles deslizamientos o caída de rocas, si bien la magnitud y el daño potencial de estos procesos sería menor que en los casos previos.

Mapa de Peligrosidad. Dentro del litoral de Ceuta no se ha determinado ninguna zona que reúna las condiciones concretas para ser consideradas de peligrosidad alta aunque sí en su interior, (Abad *et al.*, 2008). Por el contrario, se han diferenciado cuatro sectores de peligrosidad media en las costas de Ceuta que ocupan un porcentaje significativo del territorio.

El primer sector ocupa una importante extensión del Monte Hacho, al Este de la ciudad (A en Fig. 8). En estas zonas existe peligrosidad por deslizamientos y caída de rocas, especialmente en su ladera Norte, como consecuencia de la intensa fracturación y la elevada pendiente que presenta la Península de Almina (localmente >50%). Esta ladera Norte, donde se concentran las precipitaciones, se encuentra muy afectada por procesos de meteorización que dan lugar a horizontes de alteración que, a su vez, suponen niveles de baja competencia a favor de los que se pueden originar movimientos de laderas. Tal circunstancia es observable a lo largo de la carretera del Pino Gordo, durante el ascenso hacia el Faro de Ceuta, donde se han llevado a cabo diferentes medidas geotécnicas (mallas de contención) para controlar esta inestabilidad (Fig. 7C).

Un segundo sector de peligrosidad media se localiza en la costa Sur de Ceuta, concretamente en las proximidades de los acantilados de la playa del Chorrillo, al pie del Morro, y en un pequeño afloramiento cerca de la Almadraba (B en Fig. 8). En ambas zonas las pendientes varían de fuertes a muy fuertes (20-50%). Los materiales que afloran aquí corresponden a las filitas carbonosas de la Unidad de las Puertas del Campo, que se presentan intensamente fracturadas y plegadas. La naturaleza problemática de estos materiales, con tendencia a provocar deslizamientos y derrumbes, ya fue descrita a principios de siglo en la construcción de las vías del ferrocarril Ceuta-Tetuán, donde originaron numerosos contratiempos (Dupuy de Lome y Milans del Bosch, 1917).

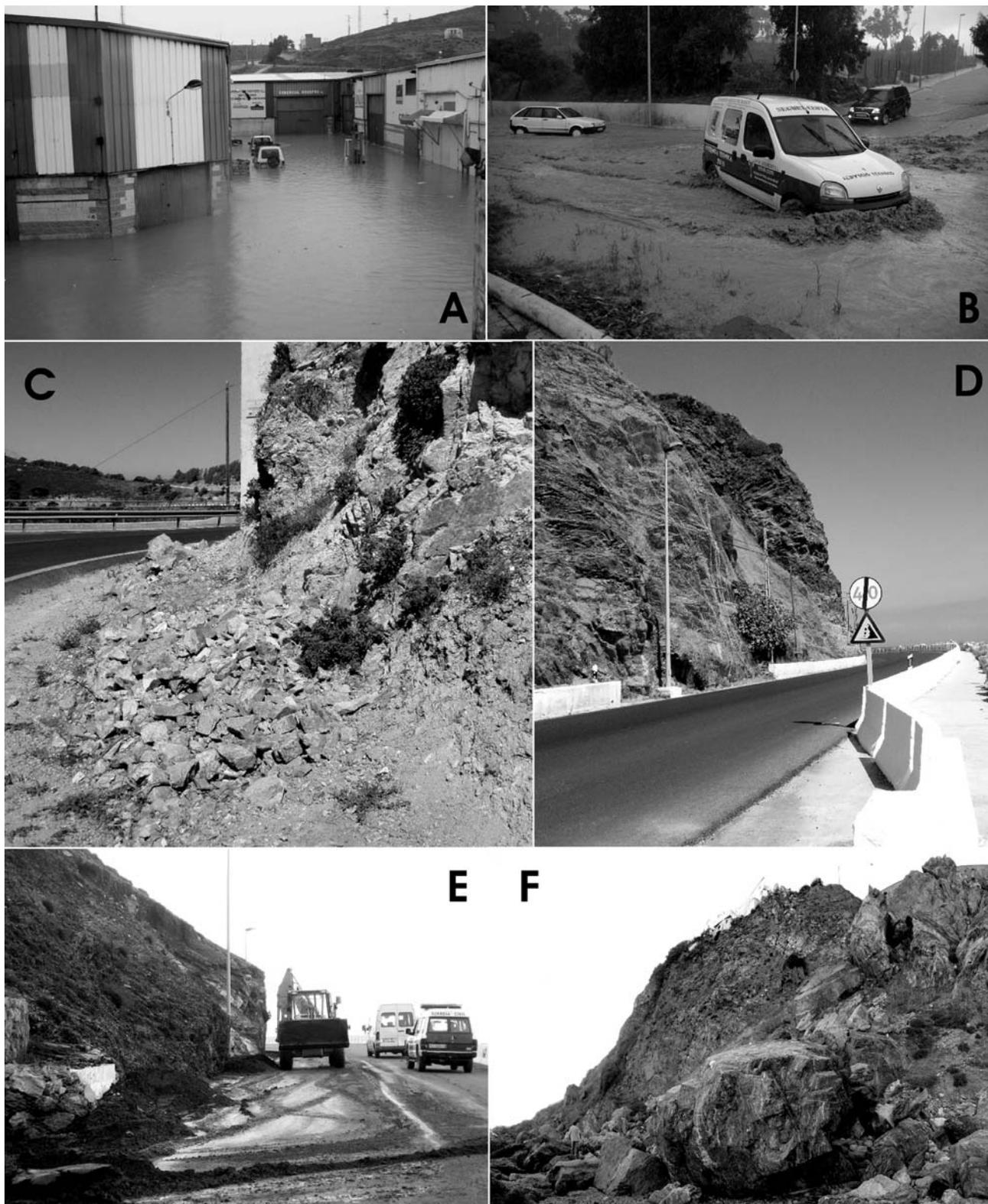


Figura 7.- Ejemplos de diferentes procesos geológicos que implican peligrosidad en el territorio de Ceuta. **A y B)** inundaciones en el polígono del Tarajal y en Barrio de Benítez durante las lluvias torrenciales de septiembre de 2007 (A y B en Fig. 6). **C)** pequeños desprendimientos en los gneiss del Hacho (A en Fig. 8). **D)** Medidas de control de deslizamientos y caída de rocas (malla de contención) en las calizas alabeadas de la Unidad de Hadu-Fnideq, en la carretera de la Playa de Calamocarro (C en Fig. 8). **E)** Desprendimientos en los taludes de la carretera de Benzú tras las tormentas de septiembre de (C en Fig. 8). **F)** Caída de bloques y grandes rocas en las peridotitas y gneiss de la Playa del Sarchal (F en Fig. 8).

El tercer sector con peligrosidad media lo constituyen las zonas de afloramiento de calizas alabeadas del sinclinal de Hadu-Fnideq y los esquistos y grauvacas de la Unidad del Fuerte de Isabel II que aparecen en la carretera N-354, al NO de la ciudad, en su tramo entre la planta desalinizadora y la playa de Calamocarro (C en Fig. 8). Esta zona presenta una pendiente media-fuerte (20-30%) y, aunque las características locales no son las más adecuadas para favorecer la existencia de fenómenos de deslizamientos y caída de rocas con una gran frecuencia, la orografía y los frecuentes cambios bruscos del trazado de la carretera posibilitan este tipo de procesos (Fig. 7D y E). A su vez, la naturaleza litológica de estos materiales, su marcada y variable estratificación, o la intensa fracturación y plegamiento que presentan, hacen frecuente la inestabilidad de laderas en esta banda de la carretera gracias al diseño vertical de los taludes, la elevada frecuencia de barrancos que atraviesan las formaciones o incluso la acción del oleaje durante los grandes temporales de invierno. El análisis de direcciones y buzamientos de fallas y de la estratificación (Fig. 9) indican una gran probabilidad de deslizamientos en tramos de la carretera con orientaciones de N350°E a N170°E, con taludes de inclinación superior a 40° E, en zonas donde el buzamiento predominante de las capas sea hacia el Este.

La última y cuarta zona media de peligrosidad se localiza en el extremo noroccidental de Ceuta, más concretamente en la barriada de Benzú (D en Fig. 8). El relieve presenta pendientes fuertes a muy fuertes (20-50%), localmente escarpadas (>50%), donde afloran mayoritariamente los materiales de la Unidad de Beni-Mesala y de Beliunex. Al igual que el sector descrito con anterioridad, estos materiales reúnen sólo algunas de las condiciones establecidas para que se produzcan inestabilidades de laderas. Se trata, en general, de materiales macizos, mal estratificados, aunque fallados y algo plegados, donde las características del terreno y las propiedades geológicas de estas rocas hacen posible que estos fenómenos tengan lugar.

Un sector de menor peligrosidad, aunque puntualmente puede llegar a representar una zona de riesgo, se localiza en la costa sur del Istmo, en una estrecha franja del litoral escarpada (pendientes del 20-30%) de va desde la Cala del Sarchal hasta aproximadamente la Punta de Mala Pasada (E en Fig. 8). Los materiales que afloran en estas zonas son las peridotitas, serpentinitas y gneiss bandeados de la Unidad del Istmo, en general bastante fracturados, lo que favorece la formación de grandes bloques que se desprenden desde lo alto del acantilado (Fig. 7F). En esta misma zona se han observado depósitos cuaternarios de laderas que registran la inestabilidad de estas vertientes en tiempos geológicos recientes.

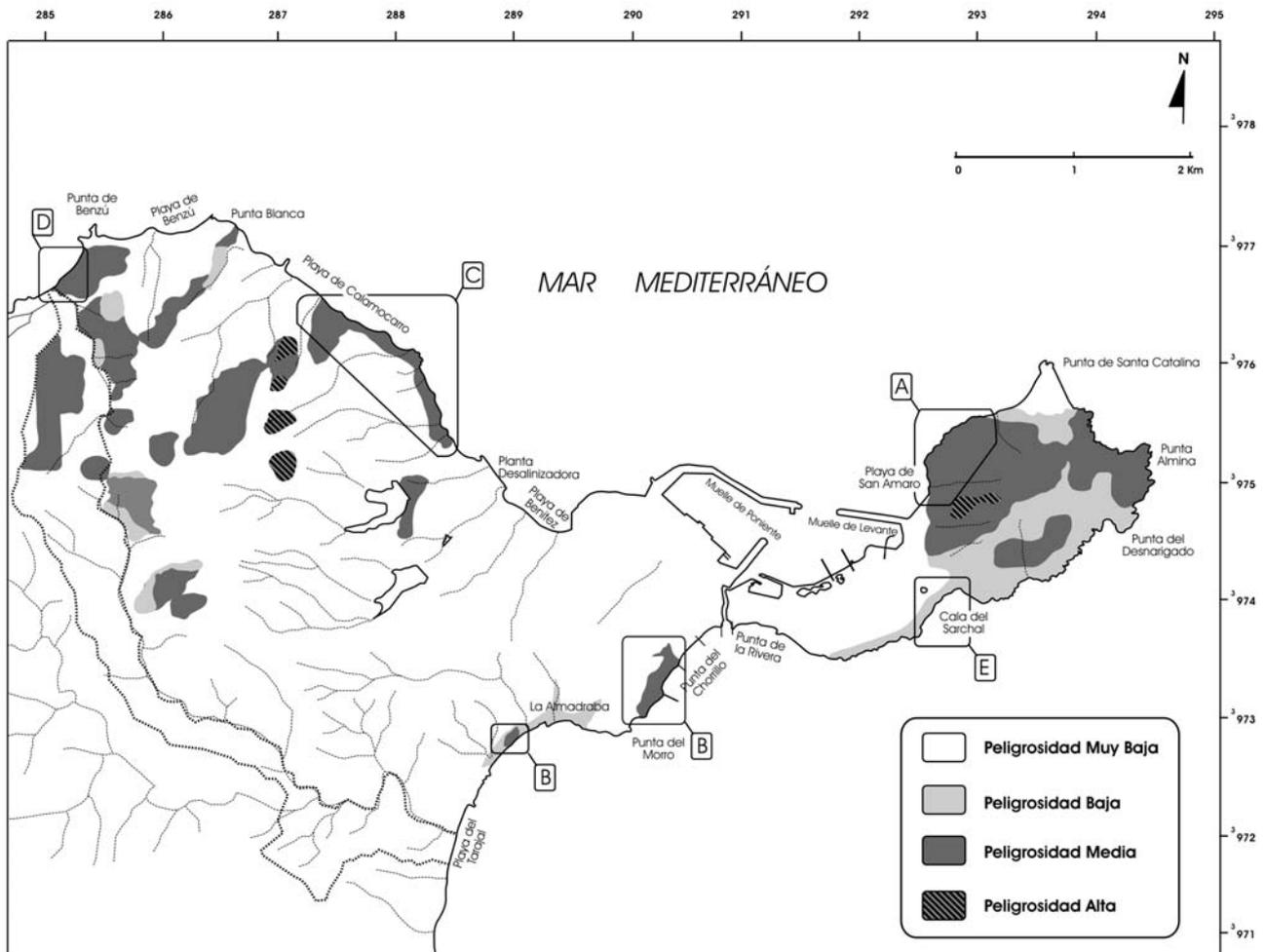


Figura 8.- Mapa de peligrosidad por deslizamientos y caída de rocas de Ceuta a escala 1:25.000.

Temporales, Ascenso del Nivel Mar y Tsunamis

Todos estos procesos conllevan una elevación del nivel de mar directamente sobre la línea de costa alcanzando, en ocasiones, infraestructuras o núcleos urbanos. Las fluctuaciones en los niveles del mar, tsunamis y temporales producen procesos de erosión acelerada y destrucción del litoral, que ocasionan elevados costes económicos y, en muchas ocasiones, pérdida de vidas humanas.

Los fenómenos de este tipo son de especial incidencia en costas de tipo micromareal, como la de Ceuta, debido a que las variaciones que se producen son mayores que las generadas por los procesos costeros habituales, como las mareas o el oleaje de mal tiempo. Esto último, unido a la característica de baja frecuencia de dichos procesos, da una falsa sensación de seguridad a las poblaciones que viven en las inmediaciones de la franja litoral, lo que a su vez favorece el desarrollo urbanístico de tales zonas. En Ceuta existen un gran número de carreteras, construcciones y viviendas que se ubican en las proximidades de la costa, a escasos metros sobre el nivel del mar. Esta circunstancia se une a su situación y configuración topográfica, su localización geológica (en la proximidad de la falla Azores-Gibraltar) y amplia longitud de su litoral.

Las tempestades o mareas meteorológicas producen una sobre elevación repentina del nivel del mar que puede durar varias horas o incluso días. Las mareas

meteorológicas se generan por una brusca oscilación del nivel del mar. Las bajas presiones asociadas a borrascas y tempestades generan un ascenso del nivel del mar, de hasta 30 y 40 cm, asociado a la depresión barométrica (Nielsen, 1991). El viento, por su capacidad de arrastrar el agua superficial marina hacia la costa, es otro factor que puede dar lugar a una invasión del mar en la costa. Los efectos de las mareas meteorológicas, combinados con un oleaje de alta energía y la pleamar, pueden llegar a ser devastadores en función de la magnitud de las borrascas y de la configuración geométrica de la costa (morfología, pendiente y calado). Las condiciones llegan a ser aún más extremas si las precipitaciones se mantienen durante más de un día. Bajo estas circunstancias se pueden producir avenidas e inundaciones en las zonas de desembocadura, ya sometidas al daño ocasionado por las tempestades. Por otro lado, la elevada pendiente de las costas de Ceuta, en su mayoría acantiladas, hace que sólo una pequeña superficie de su territorio sea susceptible de sufrir daños por tormentas meteorológicas (Fig. 10).

La subida del nivel del mar es un importante indicador de cambios climáticos. Una subida en el nivel del mar puede dar como resultado inundaciones en el litoral, la salinización de aguas dulces y erosiones costeras. El aumento de la temperatura global del planeta podría dar lugar a un ascenso del nivel del mar entre 50 centímetros y 1,40 metros en menos de 100

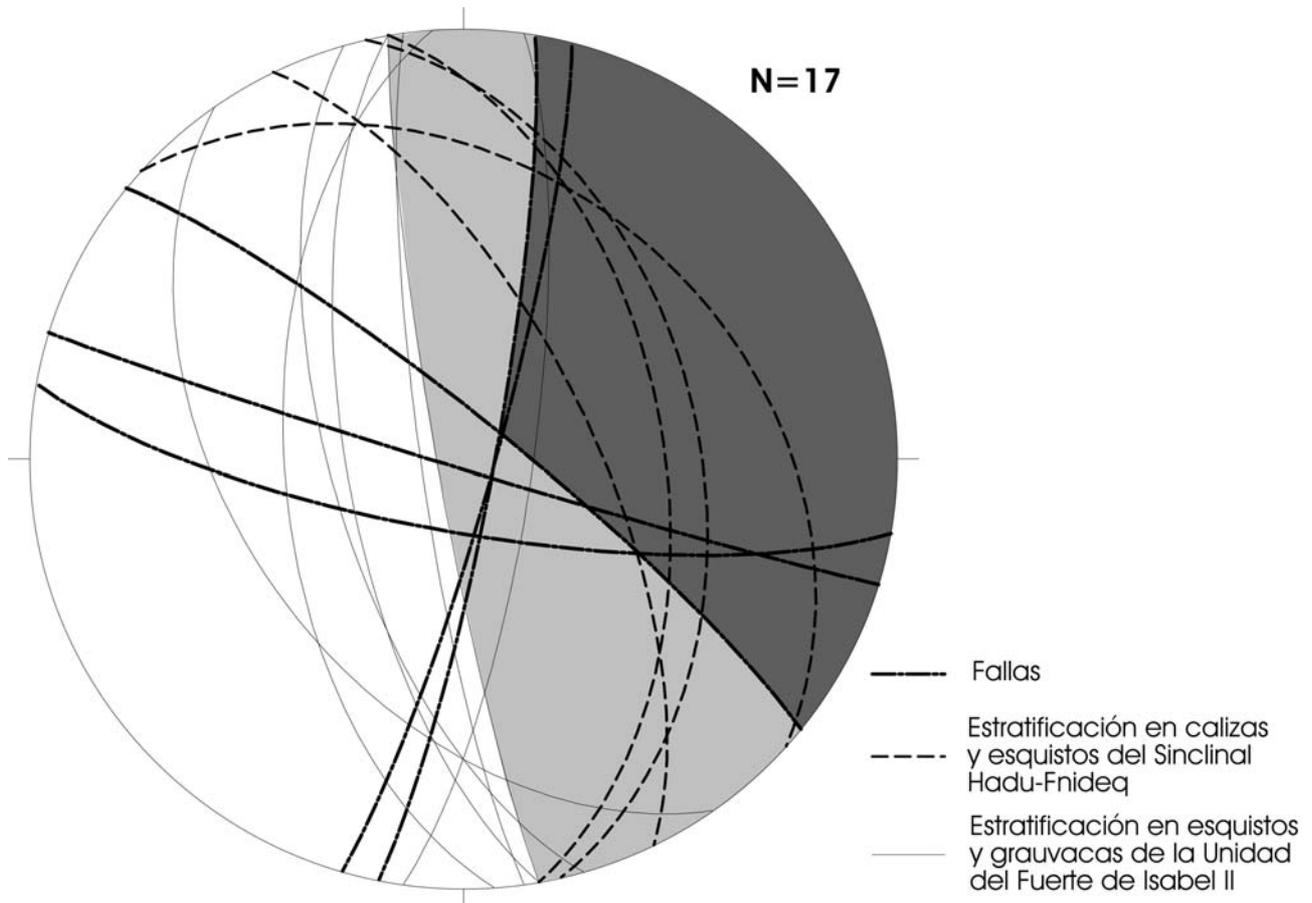


Figura 9.- Proyección estereográfica equiareal en hemisferio inferior de los diferentes planos de discontinuidad medidos en las calizas, esquistos y pizarras del sector C en Fig. 8. Los colores grises incluyen los diferentes planos de diseño de talud en que son más probables los deslizamientos y caída de rocas. N es el número de datos.

años (McCarthy *et al.*, 2001). Su posible efecto sobre la población e infraestructura es muy pequeño y se limita a una estrecha banda del litoral, ya contemplada en el resto procesos descritos en este punto.

Por último, y a pesar del elevado número de terremotos que se producen en el área de Azores y Gibraltar, la probabilidad de que Ceuta sea afectada por un tsunami es baja ya que todo el Estrecho de Gibraltar y el Golfo de Cádiz son consideradas zonas tsunamigénicas de baja intensidad (Campo *et al.*, 1992). Por otro lado, el registro regional de paleosismicidad de la costa suroeste de España y del noroeste de Maruecos sugiere la existencia de un gran terremoto cada 300-1.500 años (Ribeiro, 1994) o 1.000-2.000 años (Gutscher *et al.*, 2005). Histórica y geológicamente se tiene constancia de decenas de tsunamis con efectos catastróficos en la costa atlántica suroccidental ibérica en los últimos 5000 años (Campos, 1992; Ruiz *et al.*, 2004 y 2005; Cáceres *et al.*, 2006; Morales *et al.*, 2008), entre el que destaca el tsunami de noviembre de 1755 asociado al terremoto de Lisboa, de consecuencias catastróficas en todo el litoral del suroeste de la Península Ibérica y noroeste de África (Cáceres *et al.*, 2008).

Existe un gran volumen de literatura científica dedicada a describir el impacto de tsunamis en el Golfo de Cádiz, así como diferentes modelos predictivos de la distribución de las olas de un tsunami en las aguas del Estrecho (Campos, 1992; Baptista *et al.*, 1998; Gracia *et al.*, 2008; Kaabouben *et al.* 2009). Dada la configuración geográfica del Estrecho de Gibraltar, así como el posible punto de origen del maremoto, estos modelos especulan con que las olas llegarían muy atenuadas a las costas ceutíes (refractadas y detenidas en las costas de Cádiz y Tánger y frenadas por el choque de masas de agua en el Estrecho), lo que tan sólo ocasionaría una sobre elevación de las aguas muy similar a las experimentadas durante las mareas meteorológicas. Dicha elevación probablemente vendría acompañada por varias olas de altura algo superior a la media, que no tendrían un impacto tan catastrófico como el esperado en estos eventos en otras zonas atlánticas de España, Portugal y Marruecos.

Estas previsiones pueden contrastarse mediante las crónicas que narran los efectos de tsunamis en las costas del norte de África y en el Sur de la Península Ibérica en 1755 y, más recientemente, las perturbaciones generadas por terremotos oceánicos en el Golfo de Cádiz en 1969 y 1975. En el primer caso se estima que la ola principal, generada tras un sismo oceánico de magnitud 8.5-9, alcanzó entre 6 y 20 metros de altura en las costas de Huelva y Cádiz, perdiendo rápidamente altura y capacidad destructiva hacia el Campo de Gibraltar (James, 1771; Campos, 1992). Por desgracia, las crónicas de lo sucedido en Ceuta son mucho más pobres. Únicamente se dispone de una referencia de la «Gazzete de Cologne» recogida por Kaabouben *et al.* (2009) en la que se mencionan olas de alturas de 2,5 m sobre su altura normal (de unos 3-3,5 m en total) que provocaron más pánico en la población que daños directos en la ciudad o pérdidas de vidas humanas.

Una posible debilitación de la onda de tsunami en el Estrecho se ha podido verificar en el caso de los dos

sismos más pequeños y recientes que se produjeron en los años 1969 y 1975. Ambos fueron registrados mediante mareógrafos en Ceuta y Cádiz, lo que ha permitido establecer una comparativa entre la magnitud de las olas en las dos zonas. El tsunami no alcanzó más que a variar ligeramente la onda de marea en unos pocos centímetros. En ambos maremotos la amplitud de las sucesivas ondas generadas fue entre 3 y 6 veces mayor en Cádiz que en Ceuta (Campos, 1992).

El análisis y descripción de todos estos procesos han permitido delimitar zonas de peligrosidad alta en la franja de terreno localizada entre la línea de costa y la cota de 6,5 m sobre el nivel del mar, que define la cota más alta de la orla donde se concentran los daños ocasionados por las tormentas durante el invierno. Este valor, que se ha extrapolado a partir del valor medio del rango mareal y de la altura del oleaje, hace que la mayor parte del parte del litoral se considere sometida a una peligrosidad alta. Esta banda también constituye la zona de mayor peligrosidad ante una posible subida del nivel marino en las siguientes décadas y se trataría, aproximadamente, del área más afectada ante la llegada de un maremoto o tsunami. Existen numerosas noticias en la prensa local de los últimos cinco años en las que se describen tempestades y tormentas que generaron olas de más de 6 y 7 m de altura cerca de la costa, y vientos de levante de fuerza 9-10 en la escala de Beaufort, con rachas superiores a 100 Km/h.

Las zonas de peligrosidad media se han localizado entre las cotas 6,5 y 10 m sobre el nivel del mar, ya que por encima de esta cota, en condiciones similares a las actuales, no se estima que sean probables daños por este tipo de procesos. Generalmente, el inicio de esta zona coincide con un cambio brusco de pendiente hacia el interior del terreno, por lo que su extensión es bastante más reducida que la zona anterior. Además, dado lo escarpado de la costa de Ceuta, a excepción de eventos catastróficos y de alta energía, los daños causados aquí serían indirectos, provocados por la acción del oleaje sobre el litoral infrayacente. Por último, las áreas de peligrosidad baja o nula son las que se encuentran por encima de los 10 m sobre el nivel del mar, cota predominante en el litoral del extremo oriental (Península de Almina) y en la mayor parte de la costa meridional de la ciudad.

Mapa de Peligrosidad. Las zonas de peligrosidad alta se concentran en una banda de anchura variable, en función de la pendiente, que parte del nivel del mar actual y alcanza una cota cercana a los 6,5 m (Fig. 10). Las áreas más expuestas son los terrenos de uso comercial y recreativo ganados al mar, en la costa norte del Istmo y los terrenos portuarios y muelles de la ciudad (A en Fig. 10). Como mejor ejemplo se puede citar el temporal de marzo del año 2005, que causó daños valorados en 14 millones de euros en las instalaciones portuarias de la ciudad (Fuente: El Faro de Ceuta). También constituyen áreas de peligrosidad elevada las zonas de topografía deprimida, cercanas al litoral, que coinciden con las desembocaduras del Arroyo de Calamocarro, Arroyo Benítez, y el Arroyo de las Bombas, así como la Cala del Desnarigado (Sectores B, C, D y E en Fig. 10). Todas estas áreas poseen la característica común de ser terrenos planos, o

de pendientes muy bajas, donde el oleaje y pequeños ascensos del nivel marino pueden avanzar con facilidad hacia el interior del continente.

Una zona de características diferentes, que posee también una peligrosidad elevada aunque algo inferior a los casos anteriores al encontrarse a cotas más altas, es la carretera N-354 en el transepto comprendido entre la planta desalinizadora y el barrio de Benzú. Esta carretera, que circula paralela a la costa acantilada a alturas casi siempre inferiores a 7 m, se encuentra expuesta a la acción del oleaje en momentos de tempestades o de grandes olas (Sector F en Fig. 10).

Mapa de peligrosidad total

El análisis conjunto de los mapas de peligrosidad de los diferentes procesos ha permitido construir un mapa de peligrosidad total, también denominado de exposición a amenazas. A partir del análisis de este mapa podemos distinguir varios sectores, de pequeña extensión, donde se concentran varios tipos de procesos que actúan con un grado de peligrosidad alta (Fig. 11). La primera zona de peligrosidad muy elevada se localiza en el suroeste de Ceuta y su punto de mayor interés se centra en el Polígono del Tarajal, situado en la desembocadura del Arroyo de las Bombas (A en Fig. 11). En esta área industrial, de poco más de 400 m²,

pueden confluír procesos de avenidas e inundaciones, movimientos de laderas y tempestades, que actúan con un grado de peligrosidad considerable. Otra pequeña zona de peligrosidad muy alta se localiza en las proximidades de la Punta del Morro, donde confluyen procesos tanto de inestabilidad de laderas como tempestades o tsunamis (G en Fig. 11). Asociada a estas zonas de muy alta peligrosidad pueden incluirse otras de alta peligrosidad en el segmento de la carretera N-352 que llega hasta la frontera y parte de la Almadraba. Esta zona se encuentra expuesta en tramos a deslizamientos en las filitas de los materiales de la Unidad de Las Puertas del Campo, a avenidas e inundaciones de aguas de escorrentía procedentes del Arroyo de las Colmenas o de los Barrancos del Moral y Arcos Quebrados, e incluso al oleaje en época de tempestades de invierno.

La segunda zona de peligrosidad muy alta se localiza en la desembocadura del Arroyo del Sardinero, donde existe una alta probabilidad de que se produzcan inundaciones y se encuentra afectada, al mismo tiempo, por los procesos derivados de tempestades, tsunamis y elevación del nivel del mar (B en Fig. 11). Hay que destacar que la superficie donde coinciden ambos procesos es extremadamente pequeña pero, en su conjunto, posee valores medios de peligrosidad muy elevados.

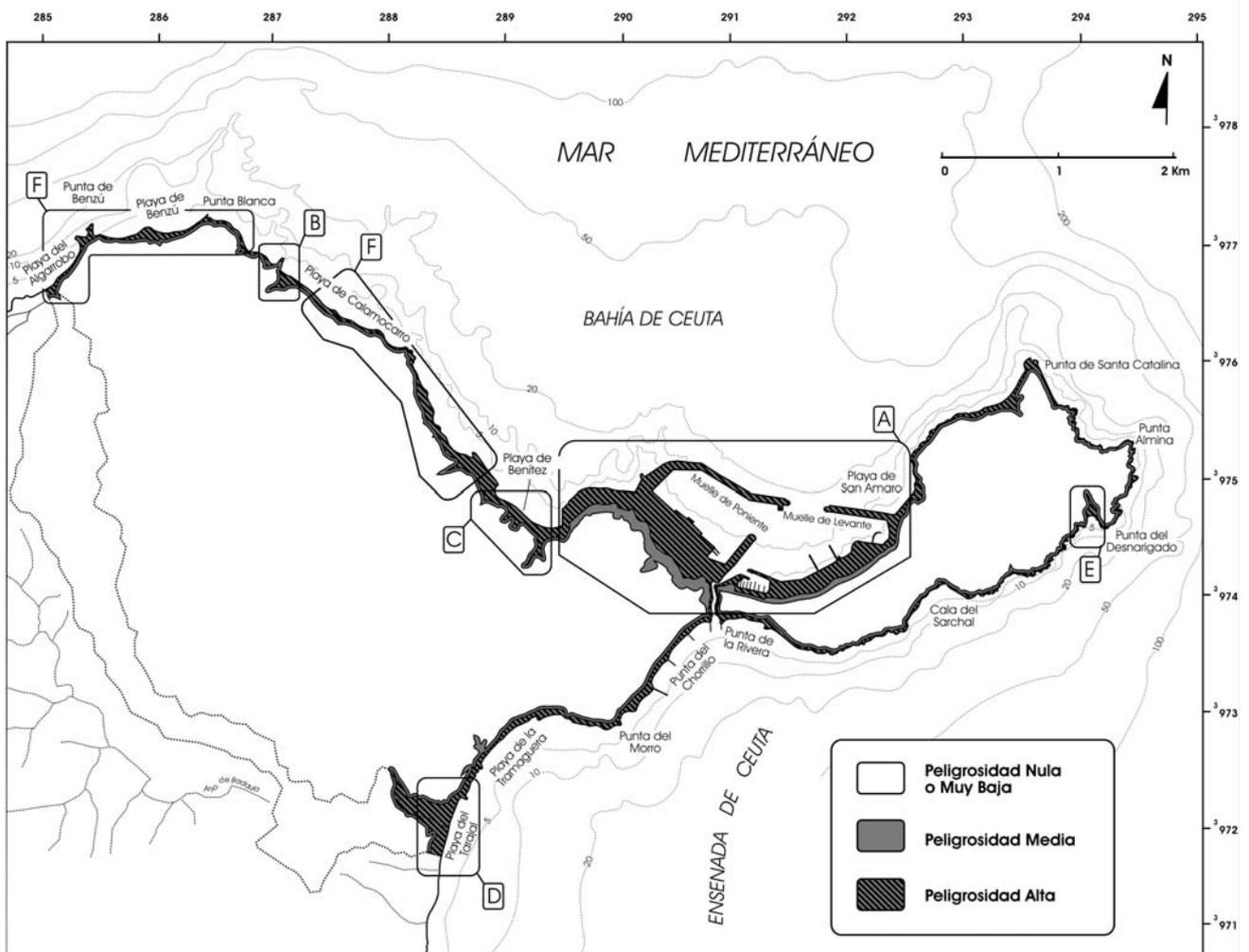


Figura 10.- Mapa de peligrosidad por temporales, tsunamis y ascenso del nivel del mar de Ceuta a escala 1:25.000.

La última zona de peligrosidad muy alta diferenciada en Ceuta es la desembocadura del Arroyo Benítez, en la playa del mismo nombre. Al igual que ocurre en el Arroyo del Sardinero, en este punto confluyen varios tipos de procesos naturales considerados y, en los tres casos, con grados de peligrosidad muy altos (C en Fig. 11).

Son zonas de peligrosidad total alta o media-alta, al margen de áreas contiguas a las de peligrosidad alta y muy alta descritas anteriormente, los terrenos ganados al mar e instalaciones portuarias del Istmo y del Campo exterior. Se trata de zonas planas, localizadas a cotas muy bajas, próximas al mar y susceptibles de ser dañadas por temporales de levante y tsunamis (D en Fig. 11). También se incluyen dentro de esta categoría varios tramos aislados de la carretera N-354 que va, prácticamente, desde la Playa Benítez a las casas de la Cabililla, afectados potencialmente en diferentes tramos por desprendimientos, avenidas en barrancos y arroyos y/o oleaje asociado a grandes temporales. Finalmente, se encuentran dentro de esta clasificación la estrecha banda de terreno localizada en la costa Sur del Istmo y de la Península de Almina (calas del Sarchall y El Desnarigado) de naturaleza muy escarpada, donde se han identificado procesos activos de desprendimientos de grandes bloques y que además están sometidos a la erosión litoral durante las tormentas de invierno y a la llegada de avenidas en momentos de lluvias torrenciales (E y F en Fig. 11).

Conclusiones

Considerando todo el territorio de la Ciudad autónoma de Ceuta, aproximadamente sólo el 15% de Ceuta se encuentra expuesto a algún tipo de proceso geológico peligroso relevante, y dentro de este 15%, sólo una décima parte puede considerarse de tipo muy alto, alto y medio-alto. El resto de la superficie está sometida a una peligrosidad de grado medio a muy bajo.

Si sólo se tiene en cuenta el litoral de Ceuta, el porcentaje de superficie sometida a algún tipo de los procesos de peligrosidad alta analizados aumenta de forma considerable y llega a alcanzar el 72% de la superficie de su costa, aunque ni tan siquiera el 1% de su superficie puede ser considerado como expuesto a una peligrosidad muy alta. En conjunto las zonas consideradas de peligrosidad de muy alta a alta se concentran en el litoral norte de la ciudad y son las desembocaduras de los arroyos de Benítez y del Sardinero, el tramo de carretera comprendido entre la planta desalinizadora y la frontera de con Marruecos y los terrenos portuarios y recreativos ganados al mar del Istmo y Campo Exterior oriental. En el litoral meridional se han delimitado dos únicas zonas aisladas de peligrosidad muy alta en el polígono del Tarajal y en la Punta del Morro. Existen también en la costa sur pequeñas zonas de peligrosidad alta en las calas del Sarchall y del Desnarigado.

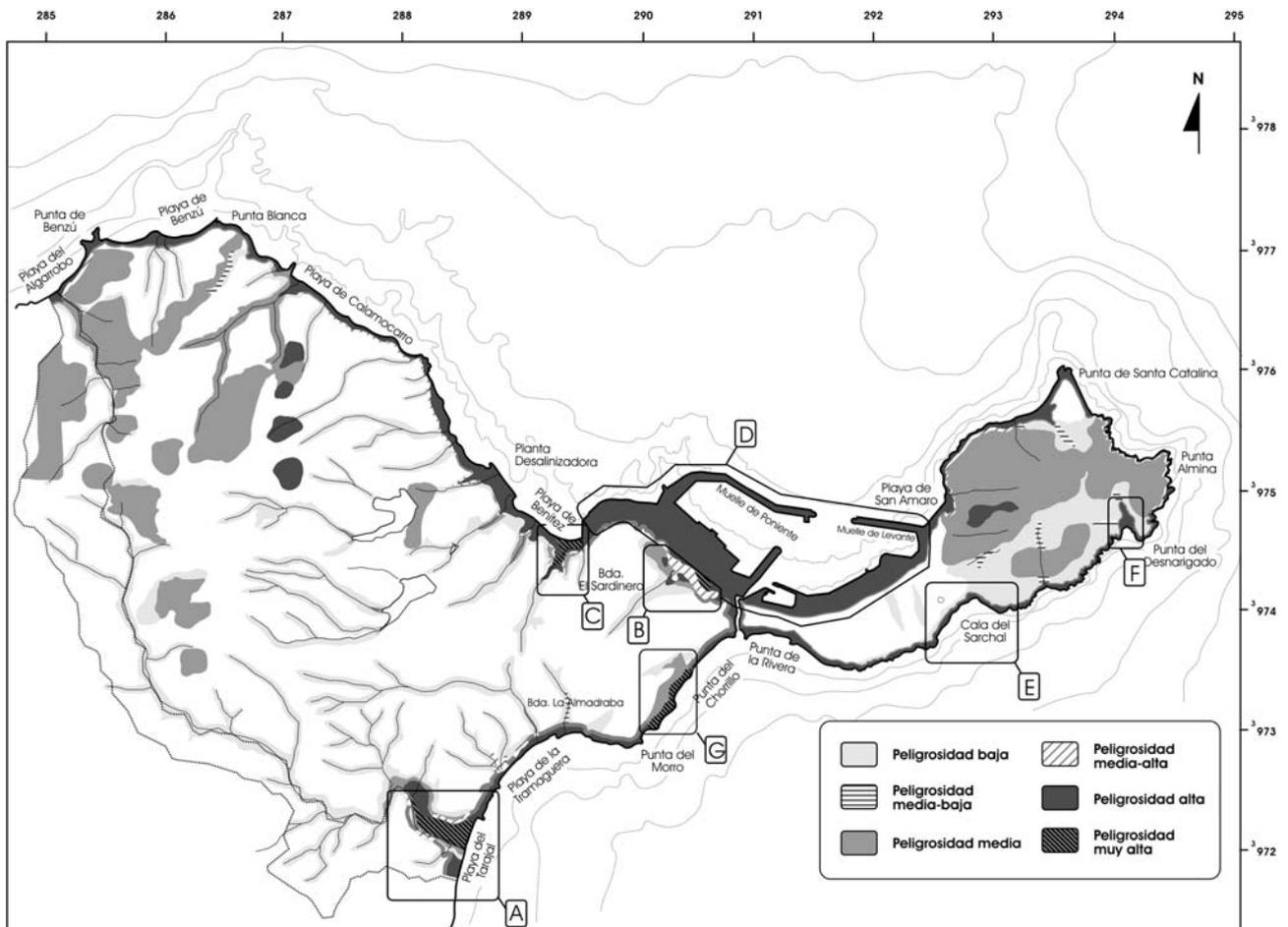


Figura 11.- Mapa de peligrosidad total o de exposición de Ceuta a escala 1:25.000.

Comparando los diferentes tipos de procesos analizados en este trabajo, el peligro por tempestades y maremotos sería el que más daño potencial podría causar, seguido por los deslizamientos y desprendimientos y las avenidas e inundaciones. A partir de todo lo anterior se concluye que, a excepción de las zonas costeras y las localizadas en las proximidades de algunas desembocaduras de arroyos y barrancos, el territorio de Ceuta no presenta un grado de exposición especialmente alto a procesos geológicos peligrosos. A menor escala, la confluencia temporal de diferentes procesos en determinadas zonas urbanizadas de la ciudad (por ejemplo, una crecida de un arroyo cerca de su desembocadura, durante un temporal) puede originar gran riesgo geológico, con resultados catastróficos en áreas muy localizadas.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la convocatoria de Ayudas a la Investigación 2006-2007 del Instituto de Estudios Ceutíes, una beca postdoctoral del XV Plan Propio de la Universidad de Huelva y un contrato de investigación postdoctoral Juan de la Cierva del Ministerio de Ciencia e Innovación del Gobierno de España. Los autores de este trabajo agradecen a Joaquín Sánchez (Quino) y Rocío Abad su inestimable ayuda en las campañas de campo y la cesión de fotografías. A su vez, los autores agradecen a dos revisores anónimos y al editor de la RSGE las sugerencias y correcciones elaboradas sobre el manuscrito original, que han mejorado considerablemente la calidad del mismo.

Referencias

- Abad, M., López-González, N., Rodríguez Vidal, J., Ruiz, F., Cáceres, L.M. (2008): *Cartografía y análisis de riesgos geológicos en la Ciudad Autónoma de Ceuta*. Memoria de proyecto de investigación del Instituto de Estudios Ceutíes, Ceuta. 51 pp.
- Ayala Carcedo, F.J. (1987): Introducción a los riesgos geológicos. En: *Riesgos Geológicos* 1, 3-21. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.
- Augusto Filho, O., Cerri, L.E.S., Amenomori, C.J. (1990): Riesgos geológicos: aspectos conceituais. En: *Anais. Simposio Latino-Americano sobre Risco Geológico Urbano* 1: 334-341.
- Baptista, M.A., Heitor, S., Miranda, J.M., Miranda, P., Mendes Victor, L. (1998): The 1755 Lisbon Tsunami. Evaluation of the tsunami parameters. *Journal Geodinamics* 25: 143-157.
- Benavente, J., Bello, E., Anfuso, G., Nachite, D., Macias, A., (2007): Sobre elevación debida a temporales y cambios producidos en las playas del litoral NE Marroquí. *Rev. C. & G.* 21 (1-1): 13-25.
- Bluestein, H.B. (1993): *Synoptic-Dynamic Meteorology in Midlatitudes. Observations and theory of weather Systems*, Oxford University Press, 594 pp.
- Bosque Sendra, J., Díaz Muñoz, M.A., Gómez Delgado, M., Rodríguez Durán, A.E., Rodríguez Espinosa, V. (2000): Sistemas de información geográfica y Cartografía de riesgos tecnológicos. El caso de las instalaciones para la gestión de residuos en Madrid. En: *Industria y medio ambiente*. Publicaciones de la Universidad de Alicante 315-326.
- Cáceres, L. M., Rodríguez Vidal, J., Ruiz, F., Rodríguez Ramírez, A., Abad, M. (2006): El registro geológico holoceno como instrumento para establecer periodos de recurrencia de tsunamis: el caso de la costa de Huelva. En: *Libro Resumen 5ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica* 5: 1-4.
- Cáceres, L.M., Ruiz, F., Rodríguez Vidal, J., Carretero, M.I., Abad, M., Pozo, M. (2008): Tsunamis en la costa de Huelva. Un riesgo real para el litoral de Lepe. En: *El Lugar Heredado* (Díaz Zamorano, A. y Otero, J. eds.). Universidad de Huelva, 149-159.
- Campos, M.L. (1992): *El riesgo de tsunamis en España*. Instituto Geográfico Nacional, Madrid. 204 pp.
- Chamorro, S., Nieto, M. (1989): *Síntesis geológica de Ceuta*. Ayuntamiento de Ceuta, 223 pp.
- Davies, J.L. (1964): A morphogenic approach to world shorelines. *Zeits fur Geomorphology* 8: 27-42.
- Dupuy de Lôme, E., Milans del Bosch, J. (1917): Zona de Ceuta, Zona de Tetuán y Zona Atlántica. En: *Estudios relativos a la geología de Marruecos*. Bol. Ins. Geol. T. XVIII ser 2º, 27-158.
- García-López, S. (1992). *Estudio Hidrogeológico de los acuíferos carbonatados del sector de la Bahía de Benzú (Marruecos)*. Tesis de Licenciatura. Universidad de Granada. Inédita, 123 pp.
- Gracia, F.J. (2008): *Geomorfología de los espacios naturales protegidos de la provincia de Cádiz*. Universidad de Cádiz, Cádiz, 195 pp.
- Gutscher, M.A., Baptista, M.A., Miranda, J.M. (2005): The Gibraltar Arc seismogenic zone (part 2). Constraints on a shallow east dipping fault plane source for the 1755 Lisbon earthquake provided by tsunami modelling and seismic intensity. *Tectonophysics* 426: 152-166.
- Felpeto, A. (1996): Modelización física y simulación numérica de procesos eruptivos para la generación de mapas de peligrosidad volcánica. Tesis Doctoral, Universidad de Madrid, 250 pp.
- Gazette de Cologne (1756): África de Ceuta le 20 Novembre.
- Hayes, M.O. (1979): Barrier island morphology as a function of wave and tide regime. En: Leatherman, S.P. (Ed.), *Barrier islands from the Gulf of St. Lawrence to the Gulf of Mexico*, Academic Press, New York, 1-29.
- Huschke, R.E. (1959): *Glossary of Meteorology*, American Meteorological Society, Boston. USA, 638 pp.
- Jaaidi, E.B., Ahmamou, M., Zougary, R., Chatre, B., El Moutchou, B., Malek, F., Naïm, K. (1992): Le littoral méditerranéen entre Tétouan et Ceuta et atlantique entre Tanger et Asilah. *Pub. Comité National Géographique Marocco*, 21-33.
- James, T. (1771): *The History of the Herculean Straits, now called The Straits of Gibraltar: including those ports of Spain and Barbary that lies contiguous thereto*. London, 414 pp.
- Kaabouben, K., Baptista, M.A., Iben Brahim, A., El Mouraouah, A., Toto, A. (2009): On the moroccan tsunami catalogue. *Natural hazards and Earth System Sciences* 9: 1227-1236.
- L.P.E.E. (1987): Rapport technique et expertise sédimentologique que sur le port de Restinga Smir (Tétouan, Maroc). En: *Mémoire C.E.A. de Géologie, Univ. Mohamed V, Faculté Science de Rabat*, 72 p.
- McCarthy, J.J., Canziani, O.F., Leary, N.A., Dokken, D.J., White, K.S. (2001): *Climate change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability*. United Nations Intergovernmental Panel on Climate Change.

- Millán, M., Estrela, M.J., Caselles, V. (1995): Torrential precipitations on the Spanish East coast: The role of the Mediterranean sea surface temperature. *Atmospheric Research* 36: 1-16.
- Ribeiro, A. (1994): Deformable plate tectonics of the Azores-Gibraltar boundary: where the next 1755 earthquake will strike again? En: *1^{er} Simposio sobre a margen continental Ibérica Atlántica*, Lisboa, Gaia, 9.
- Roca, A., Irizarry, J., Lantada, N., Barbat, A., Goula, X., Pujades, L.I., Susagna, T. (2006). Método avanzado para la evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo sísmico. Aplicación a la ciudad de Barcelona. *Física de la Tierra*: 18, 183-203.
- Ruiz, F., Rodríguez-Ramírez, A., Cáceres, L. M., Rodríguez Vidal, J., Carretero, M. I., Abad, M., Olías, M., Pozo, M. (2005): Evidence of high-energy events in the geological record: Mid-Holocene evolution of the southwestern Doñana National Park (SW Spain). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 229: 212-229.
- Ruiz, F., Rodríguez Ramírez, A., Cáceres, L. M., Rodríguez Vidal, J., Carretero, M. I., Clemente, L., Muñoz, J. M., Yañez, C., Abad, M. (2004): Late Holocene evolution of the southwestern Doñana National Park (Guadalquivir Estuary, SW Spain): a multivariate approach. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 204: 47-64.
- Sánchez-Gómez, M., Azañón, J.M., Balanyá, J.C., García-Dueñas, V., Sanz de Galdeano, C. (2004): Geología de Ceuta y Melilla (y áreas adyacentes). En: *Geología de España* (Vera, J.A., ed.). Sociedad Geológica de España-Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 444-449.
- Varnes, D.J. (1984): Hazard Zonation: A Review of Principal and Practice. Commission of Landslide of IAEG. UNESCO. *Natural Hazards* 3, 61 pp.

Sitios web consultados

- INE (2008): Datos de población. Padrón municipal. <http://www.ine.es>
- El Faro de Ceuta. Hemeroteca. <http://www.elfarodigital.es/hemeroteca.html>
- The Weather Channel Interactive; Marzo (2009): <http://www.weather.com/outlook/travel/businesstraveler/wxclimatology/monthly/SPXX0022>
- Tutiempo.net. Series temporales de datos climáticos desde 1965 a 2005. <http://www.tutiempo.net/clima/CEUTA/603200.htm>
- UNESCO (1972): Informe de la Convención sobre la protección del patrimonio mundial, cultural y natural. <http://www.patrimonio-mundial.com/convención.htm>

Manuscrito recibido el 11 de octubre de 2010

Aceptado el manuscrito revisado el 21 de diciembre de 2010