



PROPUESTA DE LUGARES DE INTERÉS GEOLÓGICO ASOCIADOS A BLOQUES DE ORIGEN TSUNAMÍTICO EN LAS COSTAS ROCOSAS DE LA ISLA DE FORMENTERA (ISLAS BALEARES)

Proposed geosites for tsunamitic blocks in the rocky coasts of Formentera (Balearic Islands)

Francesc Xavier Roig-Munar^{1*}, José Ángel Martín-Prieto^{1,2}, Antonio Rodríguez-Perea²,
Bernadí Gelabert³ y Joan Manel Vilaplana⁴

¹ QU4TRE Consultoría ambiental, C/ Carritxaret 18- apt. 6, es Migjorn Gran, Menorca, 07749.

*Corresponding author: xiscoroig@gmail.com

² Dpto. de Geografía, Universitat de les Illes Balears, Carretera de Valldemossa, km 7,5, Palma de Mallorca

³ Dpto. de Biología, Universitat de les Illes Balears, Carretera de Valldemossa, km 7,5, Palma de Mallorca

⁴ Dpto. de Geodinámica y Geofísica, Grupo RISKINAT, Universitat de Barcelona, Martí i Franquès, s/n, 08028 Barcelona

Abstract: Earthquake-triggered tsunamis from Algeria reached the coasts of the Formentera island (Balearic Islands) at least in 1980 and 2003. Meter-size isolated boulders and strings of boulders with sedimentary characteristics typical of tsunami flows are recognized in Formentera probably triggered by Algerian earthquakes in the XVIII century. The morphology, morphometry, orientation and imbrication of these boulder fields constitute a characteristic geomorphological feature of the impact of the tsunami on the rocky coastline of the Balearic Islands. Due to their high scientific, tourist and educational interest two sites in Formentera (Punta Prima and Punta Gavinia) are proposed as geosites, as representative examples of tsunami boulders on the rocky coastline of the western Mediterranean.

Keywords: Geosite, tsunamis, boulders, coastal cliff, Formentera.

Resumen: Los tsunamis provocados por los terremotos en Argelia impactaron en la isla de Formentera (Baleares) al menos en 1980 y 2003. Se reconocen en la isla bloques y cordones de bloques con características sedimentarias propias de los flujos de tsunamis, probablemente provocados por los terremotos argelinos en el siglo XVIII. La ubicación, morfología, morfometría, orientación e imbricación de estos campos de bloques constituyen un rasgo geomorfológico característico del impacto de un tsunami en la costa rocosa de la isla. Debido a sus características y singularidad se proponen dos emplazamientos como Lugares de Interés Geológico (LIG), ya que presentan elevado interés científico, turístico y didáctico como ejemplos representativos de bloques de tsunamis en las costas rocosas del mediterráneo occidental.

Palabras clave: Lugares de interés geológico (LIG), tsunamis, bloques, costa rocosa, Formentera.

Roig-Munar, F.X., Martín-Prieto, J.A., Rodríguez-Perea, A., Gelabert, B., Vilaplana, J.M., 2018. Propuesta de Lugares de Interés Geológico asociados a bloques de origen tsunamítico en las costas rocosas de la isla de Formentera (Islas Baleares). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 31(1): 35-48.

Introducción

A medida que ha crecido la población mundial, los asentamientos humanos han ocupado cada vez más áreas

susceptibles de experimentar las consecuencias de los peligros naturales (Leroy, 2006), siendo un caso especial la costa, donde se concentra el 85% de la población (Barragán *et al.*, 2013). Esta presión antrópica procede de la

intensificación de los usos residenciales, industriales y de recreación, y se asocian, en el caso del Mediterráneo, al crecimiento económico derivado de las diversas actividades turísticas y residenciales (Wesley y Pforr, 2010). Actualmente, un 10% de la población mundial reside en zonas litorales con una elevación inferior a 10 m, estando estas áreas expuestas a peligros de origen natural (McGranahan *et al.*, 2007). A menudo los registros dejados en el paisaje por eventos asociados a riesgos geológicos son muy evidentes, y pueden convertirse en hitos importantes, así como evidencias premonitorias que, si se interpretan adecuadamente, pueden utilizarse para evitar situaciones de riesgo mediante la educación, la difusión y la sensibilización sobre los peligros y riesgos geológicos (Dunbar, 2007). Rasgos importantes producidos por eventos pasados, especialmente si tienen un atractivo estético, pueden ser referentes geológicos y geomorfológicos para promover la educación geológica, ilustrando ejemplos para sensibilizar al público respecto a peligros naturales (Cortaza y Waele, 2012).

Existe la evidencia que las costas rocosas son sensibles a eventos de alta energía como tormentas (Ciavola *et al.*, 2011), huracanes, tifones o ciclones (Scheffers y Scheffers, 2006) y tsunamis (Goto *et al.*, 2009). Uno de los principales efectos de los tsunamis en las costas rocosas está representado por la presencia de bloques de grandes dimensiones desplazados tierra adentro (Biolchi *et al.*, 2015). La identificación de los bloques transportados por tsunamis y/o por tormentas es importante para el reconocimiento de la ocurrencia de eventos producidos en el pasado (Nott, 2003), así como para estimar las propiedades hidráulicas que han dado lugar a estos (Imamura *et al.*, 2008). La distinción de bloques asociados a tsunamis se basa en un conjunto de criterios sedimentológicos, morfológicos, cronológicos, estratigráficos y de organización que cabe analizar detalladamente, siendo los depósitos de bloques imbricados y alineados a lo largo de la costa, claros indicadores de transporte asociado a tsunamis (Scheffers y Kinis, 2014). En la última década, el debate sobre el transporte de bloques para discernir su origen entre tsunamis y grandes temporales ha obligado a considerar con más detalle el papel de las tormentas sobre las costas rocosas (Etienne y París, 2010), desarrollando ecuaciones que permiten estimar la sobreelevación por remonte o *run-up* necesario sobre un bloque, bajo tres supuestos: bloques sumergidos, bloques subaéreos, y bloques delimitados por juntas o fracturas (Nott, 2003; Engel y May, 2012).

En el Mediterráneo, los ejemplos documentados de bloques desplazados sobre costas rocosas por tsunamis históricos son numerosos y han sido recopilados por Scheffers y Kelletat (2003), Furlani *et al.* (2015) y ampliados por Roig-Munar (2016). Se trata de bloques de orden métrico arrancados del borde del acantilado y transportados tierra adentro, presentando unas características geomorfológicas, de orientación e imbricación, que permiten diferenciarlos de los relacionados con otros ambientes sedimentarios. Estos depósitos se localizan en plataformas litorales con escasos procesos erosivos y se-

dimentarios que permiten su conservación. En las Islas Baleares estos bloques se encuentran sobre terrazas rocosas litorales del S, E y SE de las islas, algunos situados por encima del oleaje máximo registrado, y ubicados a grandes distancias de la cornisa del acantilado donde no llegan las olas de grandes temporales. Ocasionalmente, los bloques de tsunami sobre acantilados bajos y cercanos a la línea de costa son retrabajados por el oleaje, sin que estos pierdan su características morfológicas de imbricación y orientación (Roig-Munar *et al.*, 2017a). La presencia de bloques en las costas rocosas de Mallorca fue estudiada por Bartel y Kelletat (2003), Kelletat *et al.* (2005) y Scheffers y Kelletat (2003). Roig-Munar *et al.* (2015) analizaron bloques en las costas de Menorca y Mallorca, y posteriormente el análisis fue ampliado al resto de las Baleares (Roig-Munar, 2016), aplicando diferentes ecuaciones para distinguir entre los bloques asociados a tormentas y bloques asociados a tsunamis, y definiendo su relación con las trayectorias de tsunamis procedentes del N de África (Álvarez-Gómez *et al.*, 2011).

La propuesta de algunos de estos conjuntos de bloques como Lugares de Interés Geológico (LIG) fue planteada por Motta y Motta (2007), proponiendo bloques de piedemonte en Italia. Posteriormente, Feuillet y Sourp (2011) propusieron bloques glaciares erráticos en los Pirineos franceses como parte de LIG. En el caso de bloques de tsunami, algunas áreas con presencia de bloques ubicados en las costas rocosas italianas han sido propuestas como LIG y como elementos para la concienciación social en el reconocimiento de eventos catastróficos (Cortaza y Waele, 2012). Margiotta y Sanso (2014) proponen, en la región de Salento (Italia), algunos LIG donde se encuentran bloques de tsunami con el objetivo de optar a la figura de Geoparque. Posteriormente, Sanso *et al.* (2015) apuestan por estos LIG como producto turístico. En Baleares, Roig-Munar *et al.* (2017b) proponen la creación de LIG asociados a bloques de tsunamis en las costas rocosas del SE de Menorca.

Lugares de Interés Geológico (LIG) y antecedentes de LIG en las Islas Baleares

La Ley de Patrimonio Natural y Biodiversidad (Ley 42/2007, modificada por la Ley 33/2015 de Patrimonio Natural y Biodiversidad) introduce por primera vez en la legislación española la geodiversidad y el patrimonio geológico, así como la necesidad de trabajar en pro de su conservación. La ley señala a las administraciones públicas como responsables del conocimiento y la protección del patrimonio geológico, lo que implica la elaboración del Inventario Español de Lugares de Interés Geológico (IELIG) (García-Cortés *et al.*, 2014). La vigente ley es un deber de las administraciones públicas (Art. 5.2.f) y también la declaración y gestión de los espacios naturales protegidos, donde se incluyen las formaciones geológicas, yacimientos paleontológicos de especial interés, de notoria singularidad y/o de impor-

tancia científica, y dicha declaración y protección corresponde a las comunidades autónomas (Art. 33.1-2 y 36.1). Según la vigente ley autonómica de las Islas Baleares, Ley 5/2005 para la Conservación de los Espacios de Relevancia Ambiental (LECO), el inicio del procedimiento de declaración de las categorías de Monumento Natural o Lugares de Interés Científico (LIC), corresponde al Consejo de Gobierno, mediante acuerdo tomado a propuesta de la consejería competente en materia de medio ambiente (Arts. 9, 24 y 25). Como alternativa también se puede optar por la aplicación por parte de los consejos insulares y/o ayuntamientos de la figura de Bien de Interés Cultural (BIC) como zona paleontológica, según la Ley 12/1998 del Patrimonio Histórico de las Islas Baleares (Art. 6.7), en la aplicación de alguna medida protectora de la normativa urbanística y/o de ordenación del territorio pertinente.

En las Islas Baleares hay actualmente 109 LIG, según los datos del IELIG; 42 de ellos en las islas Pitiusas, en concreto 36 en Ibiza y 6 en Formentera. Según el Inventario de Patrimonio Geológico de las Islas Baleares del Gobierno de las Islas Baleares, hay 98 LIG sin aprobar, de los cuales el 25% son de carácter geomorfológico; de estos LIG, 19 se encuentran en las islas Pitiusas, 16 en Ibiza y 3 en Formentera (Duque-Macías *et al.*, 2017). En la realización de inventarios de patrimonio geológico se recomienda que estos sean abiertos y sujetos a cambios futuros que permitan la incorporación de nuevos LIG e incluso a la eliminación de algunos de ellos, debido a su destrucción o por la pérdida irremediable de su valor geológico (Carcavilla *et al.*, 2007).

En la última década, diversos autores han aportado conocimientos científicos para la creación de nuevos LIG en las Islas Baleares, aunque aún no han sido consideradas como tales. Mas y Astudillo (2017) realizaron recientemente una propuesta de patrimonio paleontológico inmaterial del conjunto de Baleares. En Mallorca, Morey (2008) y Morey y Cabanellas (2008) proponían la valorización del patrimonio paleontológico del Pleistoceno litoral y establecieron parámetros de valoración, categorización y gestión como zonas de control. Mateos *et al.* (2011) propusieron la puesta en valor como LIG de las canteras líticas sobre materiales neógenos y cuaternarios, denominados *marés*, que posteriormente Mas (2017) propuso como patrimonio natural y cultural. Mas y Martorell (2011) y Mas (2015a, b) propusieron por primera vez en las Baleares LIG analizados mediante la metodología IELIG. Mas *et al.* (2013) propusieron un extenso catálogo de patrimonio geológico de Felanitx (Mallorca). Mas y Perelló (2015) proponían un nuevo LIG de afloramientos asociados a la crisis de salinidad Mesiniense. En Menorca, Obrador (2013) realizó un extenso análisis de la cuestión sobre el patrimonio geológico de la isla, incidiendo en la necesidad de propuestas de actuación y gestión. Poch *et al.* (2013) propusieron un modelo de gestión del patrimonio geológico de Menorca. Rodríguez *et al.* (2015) propusieron su revalorización, basándose en un listado de posibles LIG, que posteriormente Rodríguez *et al.* (2017)

proponen como proyecto de geoconservación centrado en la geodiversidad insular y basado en 36 LIG. Pons *et al.* (2017a) realizan un inventario de yacimientos del Cuaternario en el litoral como propuesta de LIG. Roig-Munar *et al.* (2017b) proponen dos LIG asociados a bloques de tsunamis en la costa rocosa del SE de Menorca. Por lo que respecta a las islas Pitiusas, Pons *et al.* (2017b) proponían el inventario paleontológico del cuaternario litoral de Ibiza y Formentera como posible LIG basado en 30 afloramientos. De estos trabajos tan solo Morey (2008), Mas y Martorell (2011), Mas (2015 a, b), Roig-Munar *et al.* (2017b) y Rodríguez *et al.* (2017) han seguido una metodología objetiva-científica de identificación y/o valoración basada en criterios cuantitativos (García-Cortés y Fernández-Gianotti, 2005; Carcavilla *et al.*, 2007; García-Cortés *et al.*, 2014).

Objetivos y metodología

El objetivo del presente trabajo es la propuesta de dos LIG asociados a los emplazamientos de bloques de tsunami de las islas Pitiusas, analizados por Roig-Munar *et al.* (2016b). De estos emplazamientos, 13 corresponden a Ibiza y 14 a Formentera, presentando ejemplos en muchos casos alterados por la mano del hombre en ambas islas. De estas áreas identificadas, las que presentan mejor estado de conservación, una vez sedimentados como depósitos de tsunamis, se encuentran en Formentera e islotes asociados, presentando campos de bloques en buen estado para reconocer las características morfológicas y sedimentológicas de los efectos de un tsunami sobre las costas rocosas, y pudiéndose identificar las áreas fuente, imbricaciones y orientaciones que permiten el reconocimiento del origen de los flujos que impactaron sobre la costa. La metodología aplicada ha consistido en:

- 1) Selección preliminar de posibles LIG en las Pitiusas y elección de áreas que cumplan con los criterios establecidos por el IELIG, Inventario Español de Lugares de Interés Geológico;
- 2) Descripción de la ubicación de las áreas seleccionadas, sus figuras de protección ambiental y urbanística, la existencia de planes de gestión y/o ordenación, y la existencia de rutas guiadas;
- 3) Descripción geomorfológica de las áreas mediante el análisis de los campos de bloques, las orientaciones, morfometrías, alturas de acantilados y remotes (*run-ups*), basados en la aplicación de las ecuaciones de Engel y May (2012);
- 4) Propuesta de LIG mediante la descripción de las características generales de cada área propuesta para su valoración como LIG, evaluando el tipo de interés y uso potencial (científico, didáctico y turístico/recreativo), aplicando en cada punto las recomendaciones y las directrices metodológicas establecidas en el IELIG (García-Cortés *et al.*, 2014), que permiten evaluar la potencialidad de sus usos, así como una estimación de su vulnerabilidad y las amenazas externas.

Selección preliminar de posibles LIG en las Pitiusas

Se toman como propuestas de LIG las áreas de Punta Prima y Punta Gavina en la isla de Formentera (Fig. 1), analizadas con el objetivo de valorar su idoneidad como dos nuevos LIG del inventario de las Islas Baleares. Estos emplazamientos son los únicos puntos de las de las islas Pitiusas de Formentera e Ibiza, que presentan condiciones favorables para reconocer los procesos geomorfológicos de un evento tsunámico sobre un área, y las dos son visitables para el gran público. El resto de áreas en buen estado, centradas en Formentera, han sido descartadas por encontrarse en los islotes cercanos, ya que presentan una notable dificultad en los accesos, mientras que las áreas de Ibiza han sido todas descartadas por presentar elevados procesos de antropización.

Contexto geológico y marítimo de Formentera

Marco geológico

Fisiográficamente la isla de Formentera se encuentra constituida por cuatro dominios (Fig. 1). En sus extremos oriental y occidental se alcanzan dos promontorios entre los que se dispone un cordón dunar de dirección NW-SE, de menos de 2 km de anchura. El promontorio oriental, la Mola, alcanza 197 m de altitud en una pla-

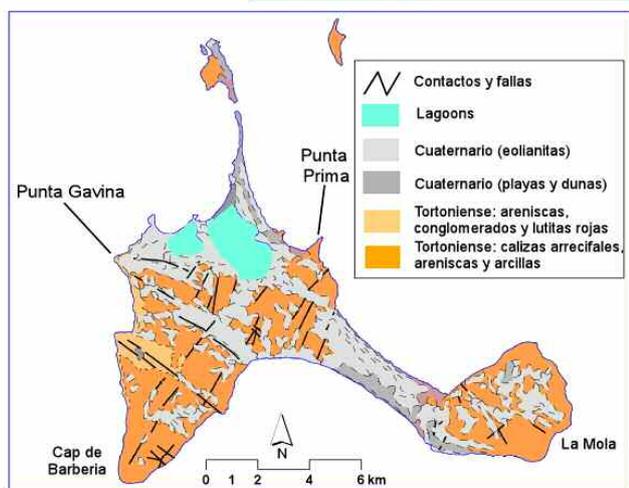


Fig. 1.- Localización y mapa geológico de Formentera, con la ubicación de las dos áreas de estudio propuestas como LIG: Punta Prima y Punta Gavina.

taforma tabular suavemente ondulada, con acantilados que sobrepasan los 100 m. El promontorio occidental, de Barberia, basculado hacia el NNE, alcanza 108 m de altitud en su extremo SSW. Geológicamente, la isla está constituida por un conjunto carbonatado de origen arrecifal depositado durante el Tortonense, sobre el que se superponen depósitos aluviales (areniscas, conglomerados y lutitas), y depósitos cuaternarios (suelos y acumulaciones eólicas). Los materiales miocenos del Tortonense afloran en buena parte de la costa, poco deformados, donde las arcillas, arenas, brechas y calizas constituyen un conjunto heterogéneo. Una fracturación bajo un régimen distensivo en el Mioceno superior dio lugar a una red de fallas normales, cuyo resultado fue la individualización de los promontorios de la Mola y Barberia (Durand-Delga y Rangeard, 2013). A grandes rasgos se trata de una alternancia de niveles tabulares de orden decimétrico a métrico dispuestos subhorizontalmente. Diversas islas e islotes insinúan la conexión entre el cordón dunar septentrional de Formentera con Ibiza, constituyendo el archipiélago intermedio entre ambas islas, que está integrado por los restos emergidos de un umbral parcialmente sumergido y cuya profundidad no alcanza los 10 m.

La influencia marina en Formentera llega hasta los acantilados más altos, habiéndose observado los efectos del *spray* marino a cotas elevadas. En las costas más bajas los efectos son más espectaculares, con presencia de grandes bloques angulosos cuyo emplazamiento es debido a tormentas (Nozal *et al.*, 2015), a procesos gravitacionales por descalce y erosión diferencial de los acantilados y/o a tsunamis (Roig-Munar, 2016). Sobre parte de las costas rocosas y acantilados se localizaban antaño bloques de grandes dimensiones, que debido a su aprovechamiento antrópico han desaparecido (Roig-Munar *et al.*, 2016b).

Clima marítimo

En Formentera, el clima marítimo difiere ligeramente entre ambas costas de la isla, por lo que respecta a la dirección del oleaje dominante. En la costa occidental el *fetch* máximo es de 500 km hacia el SW y el oleaje se caracteriza por una altura significativa de ola (H_s) con una frecuencia de 83,8% inferior a 1 m y un periodo pico de 73,7% inferior a 6 s, donde tan solo el H_s supera los 6 m en un 0,20%. La componente principal de su dirección es SW, con una frecuencia que alcanza el 25%. Su costa oriental presenta un *fetch* máximo de 900 km hacia el E, con una H_s inferior a 1 m en el 75,2% de los casos, donde tan solo el 0,11% de las veces supera los 6 m. El periodo pico se caracteriza por un 63,4% inferior a 6 m y la componente principal de su dirección es del E, con una frecuencia del 28%. Cañellas (2010) realizó una estimación de la variabilidad espacial de la recurrencia de 50 años para la altura de ola significativa del mar balear, obteniendo estimaciones en torno a los 11 m de altura en el sector oriental y de 7 m de altura en el sector occidental de Formentera.

Modelizaciones de los tsunamis que impactan en For-

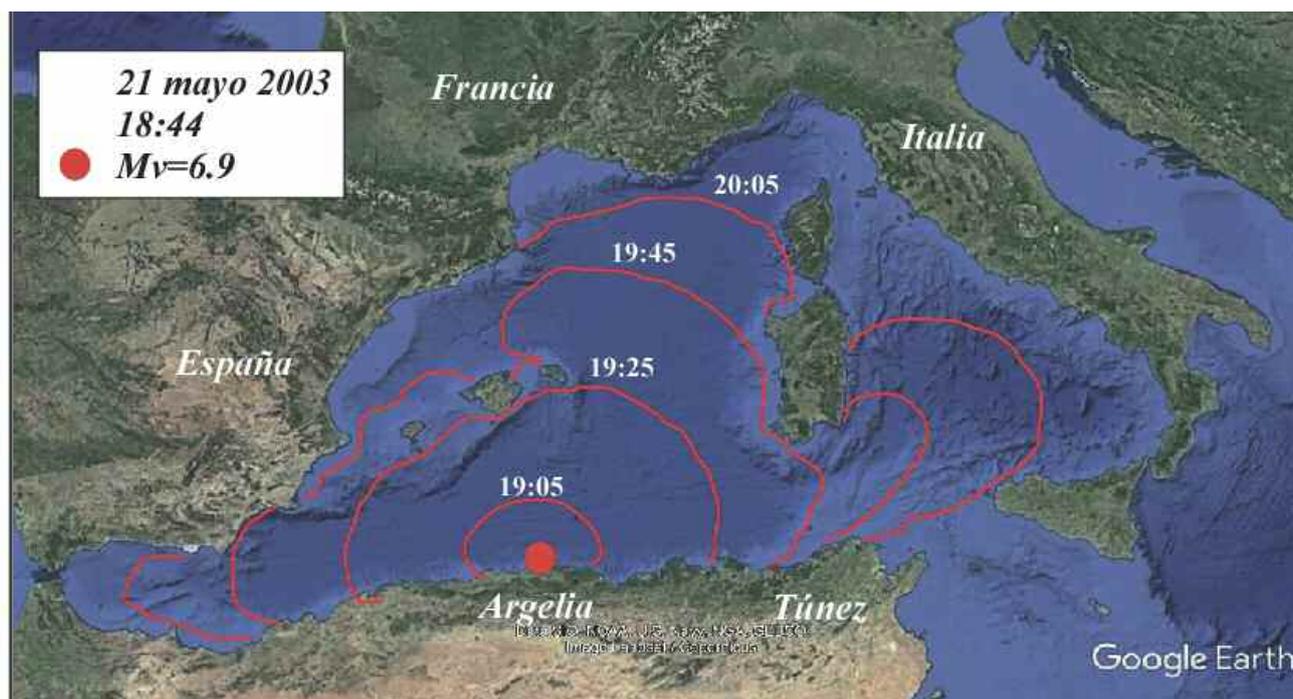


Fig. 2.- Modelización del tiempo estimado de viaje y de las áreas de impacto basadas en los registros del tsunami del 21 de mayo de 2003, con origen en el N de Argelia. Simplificado de Sahal *et al.* (2009).

mentera

El N de Argelia está expuesto a riesgos sísmicos relevantes, siendo el último evento sísmico el registrado en Boummernes-Zemmouri (Argelia) el 21 de mayo de 2003, con una magnitud de 6,9, y que afectó a la costa de las Islas Baleares. Este terremoto fue generado por una falla inversa, dando lugar a una deformación significativa del fondo marino, responsable del tsunami que se observó en las costas de Argelia, España, Francia e Italia. El máximo remonte por sobreelevación (*run-up*) medido en las Islas Baleares fue de 3 m en Sant Antoni (Ibiza), y se produjeron daños materiales en los puertos de Mallorca, Menorca e Ibiza. A raíz de estos seísmos se han sugerido varios mecanismos de generación y propagación de tsunamis en el N de Argelia con dirección hacia las Islas Baleares (Alasset *et al.*, 2006; Roger y Hébert, 2008). Sahal *et al.* (2009) representaron las trayectorias, las áreas de impacto y los tiempos de viaje de la ola del tsunami de 2003, demostrando el impacto directo en las costas de las Islas Baleares (Fig. 2).

Álvarez-Gómez *et al.* (2011) modelizaron los tsunamis generados en fuentes cercanas a la Península Ibérica y a las Islas Baleares, para identificar áreas de riesgo y zonas de impacto de tsunamis. Los resultados obtenidos muestran mapas de elevaciones de ola máxima de tsunami, a partir de nueve fuentes sísmicas entre las que se encontraban las de los terremotos acaecidos en Argelia, el de Al-Asnam, del año 1980 y el de Boummernes-Zemmouri, del año 2003. Según Álvarez-Gómez *et al.* (2011), las fuentes del N de Argelia S-1 y S-2 (Fig. 3) son las que más afectan a las costas de Ibiza y Formentera y presentan valores máximos de altura de ola de más de 2 m en el S de ambas islas, especialmente al S de Formentera, donde valores superiores a los 4 m

alcanzan el Cap de Barberia. Además de estas dos fuentes importantes, las fuentes S-3, S-4 y S-6, también pueden generar elevaciones de olas cercanas a los 2 m. Un tsunami potencial generado en una de las fuentes S-1, S-2 o S-3 llegaría a la zona suroriental y occidental de Formentera en aproximadamente 30 min, y a la isla de Ibiza en poco más de 40 min, creándose un proceso de refracción que podría afectar a la totalidad del archipiélago (Fig. 3).

Bloques de origen tsunamítico de Punta Prima y Punta Gavina

Los depósitos de bloques ubicados sobre acantilados de la costa de Formentera fueron analizados morfológicamente por Roig-Munar *et al.* (2016a, 2017b), en las zonas de Punta Prima y Punta Gavina (Fig. 1), analizando 52 bloques: 27 en Punta Prima y 25 en Punta Gavina. Estas dos áreas, formadas por materiales calcáreos del Mioceno, destacan por presentar bloques de orden métrico a distancias y alturas superiores a la influencia del oleaje de los temporales. Los emplazamientos están asociados a diferentes terrazas litorales, conformándose como sus áreas fuente por el progresivo desmonte de sus cornisas tierra adentro, resultando cordones de bloques imbricados y orientados hacia los flujos de impacto de tsunami (Roig-Munar *et al.*, 2016a). A cada bloque se le han aplicado las ecuaciones de Engel y May (2012), para obtener los valores de sobreelevación por remonte (*run-up*) de tormenta (R_s) y de tsunami (R_t) necesarios para su desplazamiento bajo dos supuestos, bloques subaéreos y bloques delimitados por juntas, descartado bloques submergidos ya que ninguno de los dos emplazamientos presenta este tipo de bloque. Para determinar el

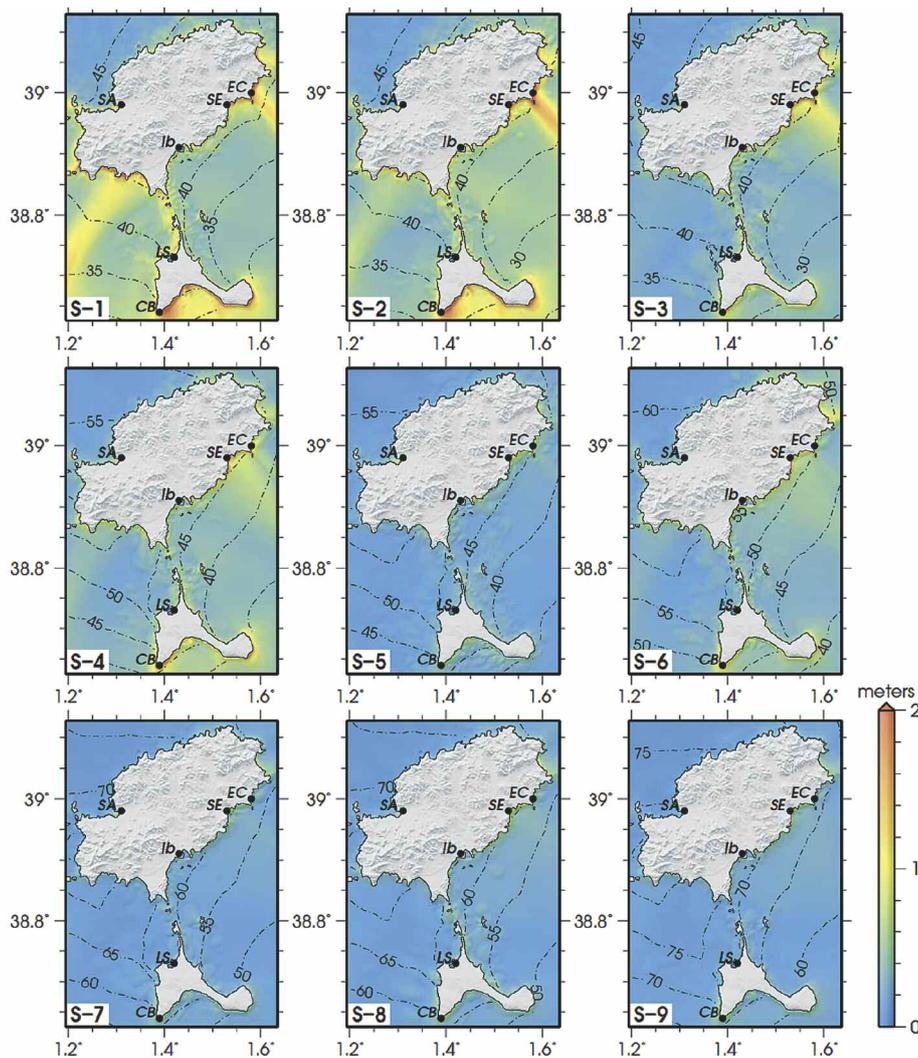


Fig. 3.- Mapas de elevación de ola máxima y tiempos estimados de viaje del tsunami en las islas de Ibiza y Formentera, según las nueve fuentes tsunámicas definidas por Álvarez-Gómez et al. (2011).

run-up de cada bloque, al resultado de dichas ecuaciones se le añade la altura s.n.m de cada bloque (Roig-Munar et al., 2017c).

Punta Prima

Punta Prima se encuentra protegida urbanísticamente (Ley autonómica 1/1991) bajo la figura de Área Natural de Especial Interés (ANEI), impidiendo su urbanización, extracciones, carreteras u otro tipo de alteraciones de carácter antrópico. El *Consell Insular* de Formentera dispone además, de una extensa red de rutas verdes autoguiadas, estando incluida esta zona en una de las rutas paisajísticas, sin que en ellas figure ninguna valoración geológica ni geomorfológica.

En el esquema geomorfológico de este área (Fig. 4), se aprecia la presencia de diferentes agrupaciones de bloques imbricados asociados a episodios de depósito de gran energía, identificándose un cordón en la zona central de la plataforma. El perfil del acantilado es de 9,5 m de altura, y presenta una plataforma litoral sin marcas de impactos recientes. La altura del oleaje máximo registrado es de 9 m y actúa sobre un acantilado de morfología cóncava. El oleaje dominante presenta una orientación de 91°, mientras que la dirección dominante

de los bloques imbricados es de 128°, claro reflejo del flujo del tsunami que actuó sobre esta zona y que no está relacionado con el oleaje de tormenta. Los valores de las dimensiones de los ejes cortos de los bloques se corresponden con la potencia de los estratos de las áreas de denudación asociadas a las terrazas litorales. El valor medio del peso de los bloques es de 8,42 T y se encuentran ubicados a una distancia media de la cornisa de 81,8 m y a una altura media de 11,7 m. En la Figura 5A se observa la tipología de perfil de costa donde se ubican los bloques analizados. La Figura 5B ilustra un bloque de grandes dimensiones que fue datado mediante la estimación de la tasa de disolución kárstica midiendo la incisión post-transporte de sus morfologías de depresiones de disolución kárstica (*kamenitzas* o *bassin pools*), con una edad estimada en el 1792 (Roig-Munar et al., 2016a). Esta datación presenta coetaneidad con las fuentes documentales de un tsunami registrado en 1756 (Fontseré, 1918) en el municipio de Santanyí (Mallorca), y con los datos analizados en bloques mediante C^{14} en las costas de Menorca (Roig-Munar et al., 2017a). Se trata de dos ubicaciones que se encuentran afectadas por las mismas trayectorias del tsunami de 2003 de Argelia que afectan a la costa de Formentera (Fig. 2). En la Figura 5C se observan cordones de bloques ubicados a 115 m de la cornisa del acantilado con imbricación y orientación hacia los flujos de Argelia. En la Figura 5D se observa la denudación progresiva de las cornisas del acantilado que se corresponde con la medida de los ejes cortos de los bloques.

Punta Gavina

Punta Gavina se encuentra protegida mediante la figura de Parque Natural (Ley autonómica 17/2001) y se encuentra dentro de la Red Natura 2000. El área cuenta con un Plan de Recursos Naturales (PORN) y con un Plan de Regulación de Usos y Gestión (PRUG), aprobados en 2002 y 2005 respectivamente. El parque ofrece una ruta hasta la torre de Punta Gavina, ubicada a escasos 15 m del campo de bloques, ruta que se inicia

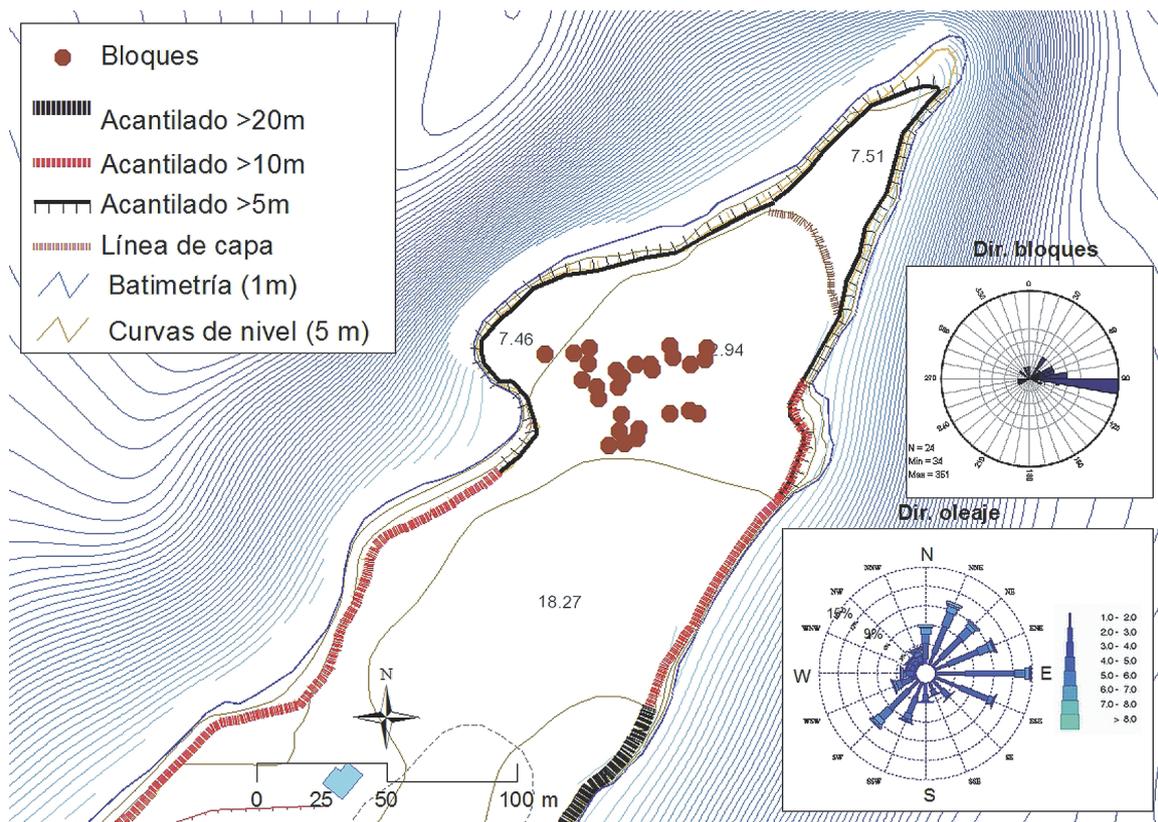


Fig. 4.- Esquema geomorfológico del área de Punta Prima, y rosas de los vientos del oleaje dominante y orientación dominante de bloques.



Fig. 5.- Área de estudio de Punta Prima. A. Acantilado sobre el que se sitúan los bloques analizados. B. Bloque de grandes dimensiones ubicado a 11,5 m s.n.m. y datado en el año 1792. C. Cordones de bloques ubicados a 115 m de la cornisa del acantilado y a 12,9 m s.n.m. D. Áreas de denudación de bloques asociados a las cornisas de los acantilados y coincidentes a los ejes cortos de los bloques trasladados.

en el centro de recepción de visitantes, donde se puede visitar una exposición sobre sus valores naturales, y el *Consell Insular* de Formentera cuenta con una de las rutas verdes autoguiadas en la zona. Ninguna de estas ofertas didácticas contemplan la valoración geológica ni geomorfológica de la zona.

El esquema geomorfológico de este área (Fig. 6) refleja la presencia de diferentes campos de cordones de bloques imbricados, dos de ellos ubicados en

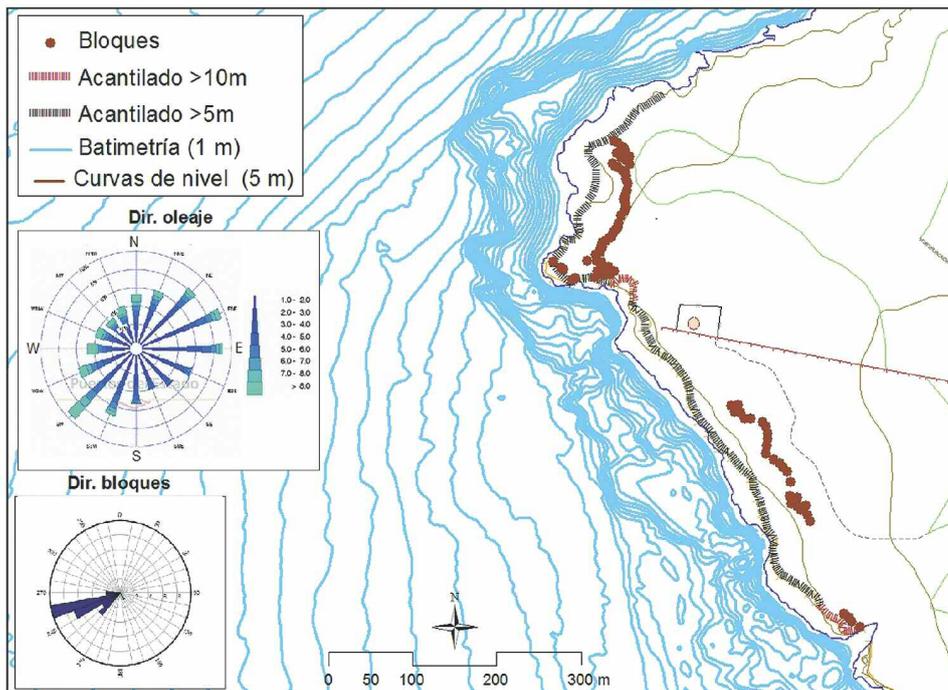


Fig. 6- Esquema geomorfológico del área de Punta Gavina, y rosas de los vientos del oleaje dominante y orientación dominante de bloques.



Fig. 7.- Área de estudio de Punta Gavina. A. Acantilado sobre el que se sitúan los bloques analizados. B. Cordones de bloques imbricados sobre la costa rocosa, pertenecientes a los estratos inferiores ubicados a 7 m s.n.m. y a 25 m de la cornisa del acantilado. C. Bloques imbricados de grandes dimensiones a 37 m de la cornisa y 8,5 m s.n.m.; D. Agrupaciones de bloques depositados a más de 85 m de la cornisa del acantilado y a 9,5 m s.n.m.

acantilados de 5,5 m, y que representan diferentes episodios de arranque y depósito de bloques asociados a flujos de gran energía sobre la costa. La altura del oleaje máximo registrado es de 8 m y actúa sobre un acantilado formado en su cornisa por escalones correspondientes a diferentes episodios de arranque de bloques, donde no se observan marcas de impactos que indiquen retrabajamiento de cordones ni de bloques aislados, ya que estos se encuentran tierra adentro y a distancias superiores a la influencia del oleaje. El oleaje dominante presenta una orientación de 196°, mientras que la dirección dominante de los bloques analizados es de 242°, por tanto se trata de una dirección indicativa de la refracción del oleaje de tsunami al impactar con la costa S de la isla (Figs. 2 y 3).

El conjunto de bloques presenta un peso medio de 10,68 T, se encuentran a una distancia media de 58,98 m y a una altura media de 11,2 m. Este área presenta además, bloques de grandes dimensiones parcialmente recubiertos por un manto eólico y con imbricaciones y orientaciones dominantes de 254,4°, similar a la de los bloques analizados. Estos bloques se encuentran a 217 m de la cornisa del acantilado y sobre una plataforma tabular a 11,5 m s.n.m. En la Figura 7A se observa el perfil de la costa donde se ubican los bloques, un perfil con una importante terraza erosiva de base y con bloques gravitacionales por descalce asociado a erosión diferencial. En la Figura 7B y C se muestra la sucesión de diferentes cordones imbricados, correspondientes a diferentes flujos de tsunami y asociados a las áreas de denudación de las terrazas inferiores. La Figura 7D corresponde a bloques de grandes dimensiones imbricados a distancias superiores a 85 m de la línea de costa y alturas mayores de 9,5 m s.n.m.

Aplicación de ecuaciones hidrodinámicas sobre los bloques

Los valores estimados de sobreelevación por remonte (*run-up*) para el arranque de los bloques correspondientes a calizas del Mioceno, con una densidad de 2,40, han sido calculados para oleajes de tormentas (Rs) y para oleaje de tsunamis (Rt) en el caso de bloques arrancados y/o desplazados (Tabla 1). Los valores promedio de remonte (*run-up*) para el arranque de bloques son de Rs: 22,09 y Rt: 14,30 en el caso de Punta Prima, y de Rs: 22,15 y Rt: 13,98 en el caso de Punta Gavina. Los valores promedio estimados en el caso del remonte (*run-up*) para el desplazamiento de bloques subaéreos, es decir ya previamente arrancados y depositados sobre las plataformas, son Rs: 13,30 y Rt: 12,10 en el caso de Punta Prima, y Rs: 13,12 y Rt: 11,73 en el caso de Punta Gavina. Resulta evidente, por lo tanto, que los valores de los remonotes necesarios en el caso de tormentas (Rs) superan con creces los valores del oleaje máximo calculados en Formentera por Cañellas (2010), descartando así estos fenómenos como el origen de estos campos de bloques.

Los resultados del remonte de tsunami (Rt) se ajustan más a los modelos de la columna de agua necesaria para el desplazamiento de cada bloque descritos por Zhao *et al.* (2017) en los flujos de tsunamis asociados a acantilados verticales, donde el flujo remonta el acantilado de forma progresiva hasta superarlo y crea campos de bloques arrancados de su cornisa. Los depósitos analizados en las dos áreas (Figs. 6 y 7) muestran bloques bien imbricados (Figs. 5C y 7B, C) donde las direcciones medias de los bloques coinciden con las direcciones modelizadas por Álvarez-Gómez *et al.* (2011) procedentes del N de África, y correspondientes a las trayectorias S-1 y S-2 (Fig. 3), ajustándose en su disposición a los criterios de Switzer y Burston (2010), que argumentan que este tipo de organización imbricada es atribuible a eventos de tsunamis. Así pues, los bloques muestran el resultado de eventos de grandes flujos asociados a tsunamis, proporcionando evidencias de eventos individuales y/o múltiples sobre la misma área, con una clara correlación con los modelos de propagación de tsunamis (Figs. 2 y 3), y avalados por la aplicación de las ecuaciones hidrodinámicas para establecer las columnas de agua (*run-up*) necesaria para el transporte y arranque de estos (Tabla 1).

Propuesta de LIG

De acuerdo con la Ley 42/2007 de 13 de diciembre, y su modificación 33/2015, se considera Patrimonio Geológico al conjunto de recursos naturales geológicos de valor científico, cultural y/o educativo, que sean formaciones y estructuras geológicas, formas del terreno, minerales, rocas, meteoritos, fósiles, suelos y otras manifestaciones geológicas que permitan conocer, estudiar e interpretar: 1) el origen y la evolución de la Tierra, 2) los procesos que la han modelado, 3) los climas y paisajes del pasado y presente, y 4) el origen y la evolución de la vida. Según Carcavilla *et al.* (2007) para que un elemento sea patrimonio geológico se tienen que dar simultáneamente tres circunstancias clave: 1) que sea de origen natural, 2) que tenga carácter geológico, y 3) que posea un valor científico, cultural y/o educativo. Además, los testimonios de estos procesos son tanto los materiales rocosos, como sus estructuras y la disposición que presenta en el medio natural. La relevancia de los dos LIG propuestos radica en que constituyen la manifestación inequívoca de procesos tsunamíticos que han afectado a la isla de Formentera en los últimos tres siglos. Para la valoración de los LIG se ha aplicado la metodología propuesta por García-Cortés *et al.* (2014). La valoración de cada una de las áreas analizadas se resume en la Tabla 2, donde cada área ha sido valorada y analizada mediante la aplicación de los valores descritos en el Anejo II de los IELIG para caracterizar el interés científico, didáctico y turístico de cada área propuesta.

| Propuestas LIG | Bloques arrancados | | Desplazamientos de bloques | |
|----------------|--------------------|-------|----------------------------|-------|
| | Rs | Rt | Rs | Rt |
| Punta Prima | 22,09 | 14,30 | 13,30 | 12,10 |
| Punta Gavina | 22,15 | 13,98 | 13,12 | 11,73 |

Tabla 1.- Remontes por sobreelevación (*run-up*) promedio de los bloques analizados. Se obtienen mediante la aplicación de las ecuaciones de Engel y May (2012) a los que se suma la altura de cada bloque s.n.m. (Roig-Munar *et al.*, 2017).

| Yacimiento | | | | | | P. Prima | P. Prima | P. Prima | P. Gavina | P. Gavina | P. Gavina |
|---|-----------------|------------------|---------------|-------------------|--------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | P. Prima | P. Gavina | V. científico | V. didáctico | V. turístico | Fic | Fid | Fit | Fic | Fid | Fit |
| Representatividad | 4 | 4 | 30 | 5 | | 120 | 20 | 0 | 120 | 20 | 0 |
| Carácter de localidad tipo | 1 | 1 | 10 | 5 | | 10 | 5 | 0 | 10 | 5 | 0 |
| Grado de conocimiento científico del lugar | 4 | 4 | 15 | 0 | | 60 | 0 | 0 | 60 | 0 | 0 |
| Estado de conservación | 2 | 4 | 10 | 5 | | 20 | 10 | 0 | 40 | 20 | 0 |
| Condiciones de observación | 2 | 4 | 10 | 5 | 5 | 20 | 10 | 10 | 40 | 20 | 20 |
| Rareza | 2 | 2 | 15 | 5 | | 30 | 10 | 0 | 30 | 10 | 0 |
| Diversidad | 2 | 4 | 10 | 10 | | 20 | 20 | 0 | 40 | 40 | 0 |
| Contenido didáctico | 2 | 2 | | 20 | | 0 | 40 | 0 | 0 | 40 | 0 |
| Infraestructura logística | 4 | 4 | | 15 | 5 | 0 | 60 | 20 | 0 | 60 | 20 |
| Densidad de población | 1 | 1 | | 5 | 5 | 0 | 5 | 5 | 0 | 5 | 5 |
| Accesibilidad | 2 | 1 | | 15 | 10 | 0 | 30 | 20 | 0 | 15 | 10 |
| Tamaño del LIG | 2 | 2 | | 0 | 15 | 0 | 0 | 30 | 0 | 0 | 30 |
| Asociación con otros elementos de PN y/o PC | 2 | 4 | | 5 | 5 | 0 | 10 | 10 | 0 | 20 | 20 |
| Espectacularidad o belleza | 0 | 2 | | 5 | 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 40 |
| Contenido divulgativo | 2 | 2 | | 15 | 0 | 0 | 0 | 30 | 0 | 0 | 30 |
| Potencialidad para realizar actividades turísticas y recreativas | 2 | 2 | | 5 | 0 | 0 | 0 | 10 | 0 | 0 | 10 |
| Proximidad a zonas recreativas (demanda potencial inmediata) | 2 | 2 | | 5 | 0 | 0 | 0 | 10 | 0 | 0 | 10 |
| Entorno socioeconómico | 1 | 1 | | 10 | 0 | 0 | 0 | 10 | 0 | 0 | 10 |
| TOTAL | 37 | 46 | 100 | 100 | 100 | 280 | 220 | 155 | 340 | 265 | 205 |
| TOTAL | | | | | | 7 | 5,5 | 3,9 | 8,5 | 6,6 | 5,1 |
| Criterio | P. Prima | P. Gavina | Peso | F.P. Prima | F.P. Gavina | | | | | | |
| Tamaño del LIG | 1 | 1 | 40 | 40 | 40 | | | | | | |
| Vulnerabilidad al expolio | 0 | 0 | 30 | 0 | 0 | | | | | | |
| Amenazas naturales | 3 | 4 | 30 | 90 | 120 | | | | | | |
| TOTAL | 4 | 5 | 100 | 130 | 160 | | | | | | |
| Criterio | P. Prima | P. Gavina | Peso | F.P. Prima | F.P. Gavina | | | | | | |
| Amenazas antrópicas | 1 | 0 | 20 | 20 | 0 | | | | | | |
| Interés para la explotación minera | 0 | 0 | 15 | 0 | 0 | | | | | | |
| Amenazas naturales | 3 | 3 | 30 | 90 | 90 | | | | | | |
| Fragilidad intrínseca | 1 | 1 | 40 | 40 | 40 | | | | | | |
| Régimen de protección del lugar | 2 | 2 | 15 | 30 | 60 | | | | | | |
| Protección física o indirecta | 2 | 2 | 15 | 30 | 60 | | | | | | |
| Accesibilidad | 1 | 2 | 15 | 15 | 30 | | | | | | |
| Régimen de propiedad del lugar | 1 | 1 | 10 | 10 | 10 | | | | | | |
| Densidad de población | 1 | 1 | 5 | 5 | 5 | | | | | | |
| Proximidad a zonas recreativas | 1 | 1 | 5 | 5 | 5 | | | | | | |
| VALORACION FINAL valor máximo 400 | 13 | 13 | | 245 | 300 | | | | | | |
| Interés científico del LIG -Ic- | 252 | 308,5 | | | | | | | | | |
| Interés didáctico del LIG -Id- | 250,5 | 305,6 | | | | | | | | | |
| Interés turístico del LIG -It- | 248,9 | 305,1 | | | | | | | | | |
| Fragilidad del LIG -F- | 130 | 160 | | | | | | | | | |
| Vulnerabilidad por amenazas antrópicas sobre el LIG -A- | 245 | 300 | | | | | | | | | |
| Susceptibilidad de degradación del LIG (SD = (F x A) x 1/400) | 79,63 | 120,0 | | | | | | | | | |
| Prioridad de protección por su interés científico (PPc=IcE2 x SD x 1/400E2) | 39,02 | 36,30 | | | | | | | | | |
| Prioridad de protección por su interés didáctico (PPd=IDE2 x SD x 1/400E2) | 24,09 | 18,02 | | | | | | | | | |
| Prioridad de protección por su interés turístico-recreativo -PPt- | 11,96 | 86,70 | | | | | | | | | |
| Prioridad de protección global (PP=(Ic+Id+It) / 3)2 x SD x 1/400E2) | 49,86 | 92,03 | | | | | | | | | |

Tabla 2.- Valoración del interés científico, didáctico y turístico de cada LIG de acuerdo con la metodología del IELIG (García-Cortés *et al.*, 2014).

Punta Prima

Interés. En la Tabla 2 se detalla la valoración de los parámetros empleados para caracterizar el interés científico, didáctico y turístico de este área. De todos los valores, el más sobresaliente es el científico con 7 puntos, superando el valor 6,65 propuesto en el Anejo II de la EILIG, debiéndose considerar como un lugar de interés muy alto, por lo que debería quedar recogido en el inventario LIG de las Islas Baleares. Por otro lado, el valor didáctico debe considerarse alto con una puntuación de 5,5, no siendo un valor elevado pero sí a tener presente, ya que los depósitos, a pesar de su orientación e imbricación, no representan un excelente ejemplo de bloques imbricados pero sí de bloques ubicados a cotas muy altas, muy alejados de la cornisa, y asociados al desmantelamiento de áreas fuente bien definidas y reconocibles en el campo. Destaca el valor bajo de su interés turístico, con una puntuación de 3,9, a pesar de que no es un valor inferior a los propuestos en el Anejo II de la EILIG, con un valor de 3,3. Considerando que ha de ser tenido en cuenta al estar incluido en las rutas propuestas en la isla y ser de acceso rodado a escasos 250 m del emplazamiento.

Fragilidad. Es un área de una fragilidad media, con 130 puntos. Ello implica que constituye un elemento natural relativamente frágil, poco expuesto a su alteración o destrucción por acciones antrópicas y/o naturales, a

consecuencia principalmente de que se encuentra dentro de una zona protegida mediante la figura de Área Natural de Especial Interés.

Amenazas. El valor estimado para las amenazas externas es de 245 puntos, dado que constituyen elementos expuestos a la posible afectación antrópica asociada a un uso público del espacio, especialmente aquellas asociadas a la posible destrucción de las depresiones kársticas, como elementos de datación y exposición didáctica o bien la posibilidad remota de grafitis sobre estas rocas.

Susceptibilidad de degradación. Debido a la ubicación de estos bloques sobre plataformas desprovistas de vegetación, con poca actividad antrópica y donde se descartan la influencia de eventos de tipo natural como deslizamientos o colapsos de acantilados que los afecten directamente, temporales o hundimientos, la degradación potencial está limitada únicamente a nuevos eventos de tsunamis, con un valor de 79,63 puntos.

Prioridad de protección global. La prioridad de protección global es elevada, de 49,86 puntos, y por ello se propone poner en valor este espacio como LIG para su conservación, con la señalización del punto y dando a conocer su valor científico, didáctico y cultural. En este caso es difícil la expoliación de elementos por su tipología, magnitud, peso y acceso.

Su valor geológico en referencia a la singularidad reside en la existencia de pocos elementos a escala regio-

nal con potencial científico y didáctico, ya que permite interpretar y comparar la historia y los procesos geológicos y geomorfológicos litorales.

Punta Gavina

Interés. En la Tabla 2 se detalla la valoración de los parámetros empleados para caracterizar el interés científico, didáctico y turístico de este área. De todos los valores, el más sobresaliente es el científico con 8,5 puntos, superando el valor 6,65 propuesto en Anejo II de la EILIG, debiéndose considerarse como un lugar de interés muy alto, y que debería quedar recogido en el inventario de LIG de las Islas Baleares, ya que se trata de una área donde podemos observar excelentes ejemplos de bloques imbricados, campos de bloques lejos de la cornisa del acantilado y campos de bloques recubiertos por mantos eólicos. El valor didáctico representa 6,6 puntos, lo que implica que se trata de un área con un interés muy alto, especialmente porque representa una clara sucesión de terrazas denudadas, cordones de bloques imbricados y bloques aislados que evidencian diferentes eventos tsunamíticos de gran energía sobre la misma área. El valor obtenido para el uso turístico es de 5,1, ya que permite observar bloques imbricados y transportados a distancias muy lejanas de la línea de costa y con una misma orientación, testimonio de antiguos eventos, hecho que puede favorecer el espacio como punto geoturístico de la isla. Los valores de Punta Gavina se encuentran entre valores estimados como altos y muy altos

Fragilidad. Es un área de una fragilidad media, con 160 puntos, lo que implica que constituye un elemento natural poco expuesto a la destrucción antrópica pero si a la destrucción por futuros tsunamis que permitirán un nuevo registro sedimentario o la modificación del presente. La presencia de estas áreas dentro de un Parque Natural y dentro de la Red Natura 2000 refuerzan su protección como espacio natural.

Amenazas. El valor estimado para las amenazas externas es de 300 puntos, un valor medio a bajo por lo que se considera que constituye un LIG no expuesto a la afección antrópica asociada a actividades de edificación o uso público de espacios litorales, debido a que se incluyen en un espacio protegido. Pero por otra parte, debido a su ubicación, por lo que respecta a la cornisa del acantilado, se encuentra más amenazado por un eventual tsunami.

Susceptibilidad de degradación. Debido a la ubicación de estos bloques sobre plataformas denudadas de vegetación, con poca actividad antrópica, con servicios de vigilancia del Parque Natural, y lejos de la influencia de eventos de tipo natural como deslizamientos, erosiones derivadas de procesos que los afecten directamente, temporales, tormentadas o hundimientos, la degradación está solo sometida a eventos de tsunami, con un valor de 120 puntos.

Prioridad de protección global. La prioridad de protección global es elevada, de 92,03, por lo que se propone poner en valor este espacio para su divulgación con la señalización adecuada para dar a conocer su valor cien-

tífico, didáctico y cultural. No se considera necesario llevar a cabo medidas de protección estructural dado que su estado es bueno y se encuentra dentro una zona protegida, siendo el elemento más representativo dentro del complejo de bloques de tsunami y cordones imbricados de la isla de Formentera e incluso dentro del archipiélago de las islas Pitiusas.

Conclusiones

Se proponen dos nuevos Lugares de Interés Geológico (LIG), Punta Prima y Punta Gavina, para incluir en el Inventario Español de Lugares de Interés Geológico y en el inventario de Patrimonio Geológico de las Islas Baleares, isla de Formentera, que están constituidos por depósitos de bloques imbricados en forma de cordones y de bloques aislados, asociados a acantilados, y no afectados por temporales, ya que los bloques son el resultado del flujo de tsunamis. Las dos ubicaciones propuestas presentan interés geológico por su representatividad como bloques de grandes dimensiones asociados a las trayectorias de tsunamis procedentes del N de Argelia. Los depósitos de tsunami analizados ejemplifican bien los procesos de denudación progresiva de las terrazas litorales por flujos de tsunamis, y su posterior transformación en campos de bloques a cotas superiores, pudiendo diferenciarse episodios de diferentes eventos por la denudación de terrazas y bloques sedimentados.

Los dos LIG propuestos tienen un alto valor científico, puesto de manifiesto en estudios previos (Roig-Munar, 2016; Roig-Munar *et al.*, 2016a, 2017b), y se recomienda poner énfasis en su contextualización como LIG dentro del ámbito del Mediterráneo. Constituirían los primeros LIG de campos de bloques de tsunami propuestos en las islas Pitiusas, y son considerandos como de interés sedimentológico y geomorfológico, y de relevancia nacional e internacional dentro de la cuenca mediterránea occidental, según los criterios de García-Cortés *et al.* (2014).

Ninguno de los afloramientos presenta fragilidad alta ni amenazas antrópicas, excepto los fenómenos futuros de nuevos tsunamis que pueden desconfigurar el área para la creación de nuevos campos de bloques y nuevos cordones o el retrabajamiento de los presentes.

Los dos emplazamientos propuestos también cuentan con un gran valor didáctico y educativo, ya que ilustran acontecimientos geológicos (tsunamis), convirtiéndose estas áreas en un ejemplo del riesgo geológico asociado a las trayectorias de tsunamis procedentes de Argelia. Estos LIG pueden ayudar a aumentar la conciencia y la percepción de los riesgos geológicos de las poblaciones que se encuentran en costas afectadas por tsunamis, y que las modelizaciones establecen como puntos de impacto potencial. Esta característica de los LIG propuestos refuerza su carácter didáctico a toda la población local y visitante, especialmente en una isla turística con un dominio de litoral sedimentario de cotas bajas y con elevados índices de frecuentación.

A pesar de que las áreas propuestas como LIG están protegidas mediante la figura de Parque Natural (Ley au-

tonómica 17/2001), no han sido utilizadas como recursos didácticos, a pesar de existir diferentes rutas propuestas para cada uno de ellos. Es recomendable que estas áreas sean incorporadas dentro de las líneas de educación ambiental del Parque Natural y dentro de las rutas verdes autoguiadas del *Consell Insular* de Formentera. Así mismo, es recomendable la incorporación de la presencia y las características de los bloques de tsunami dentro de las exposiciones de los valores naturales del Parque. Es recomendable que las revisiones del Plan de Regulación de Usos y Gestión, del Plan de Recursos Naturales y de los Planes de Gestión de la Red Natura 2000 tengan presente su emplazamiento dentro del Parque Natural.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer al personal del Parque Natural de *ses Salines de Eivissa y Formentera* las facilidades para el acceso rodado a Punta Gavina para el estudio y análisis del emplazamiento, a los que se enviará una copia del presente trabajo para dar difusión de la propuesta de LIG al *Consell Insular* de Formentera. Los autores también quieren agradecer las correcciones y sugerencias realizadas por el Dr. J.A. Morales González y por el Dr. J.J. Durán Valsero, que han contribuido de forma considerable a la mejora de este trabajo. Agradecer también a la editora de la revista, Beatriz Bádenas, ya que sus sugerencias finales han ayudado a una mejor lectura y comprensión del artículo final.

Referencias

- Alasset, J.P., Hébert, H., Maouche, S., Calbini, V., Meghraoui, M., 2006. The tsunami induced by the 2003 Zemmouri earthquake (Mw p 6.9 Algeria): modelling and results. *Geophysical Journal International*, 166: 213-226.
- Álvarez-Gómez, J.A., Aniel-Quiroga, I., González, M., Otero, L., 2011. Tsunami hazard at the Western Mediterranean Spanish coast from seismic sources. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11: 227-240.
- Barragán, J.M., Dadon J.R., Matteucci, S.D., Morillo, J.H., Baxendale, C., Rodríguez, A., 2003. Preliminary Basis for an Integrated Management Program for the Coastal Zone of Argentina. *Coastal Management*, 31(1): 55-77.
- Bartel, P., Kelletat, D., 2003. Erster Nachweis holozäner Tsunamis im Westlichen Mittelmeergebiet (Mallorca, Spanien) mit einem Vergleich von Tsunami und Sturmwellenwirkung auf Festgesteinsküsten. *Ber. Forsch. Technol.-Center Kiel Buüsum*, 28: 93-107.
- Biolchi, S., Furlani, S., Antonioli, F., Baldassini, N., Causon Deguara, J., Devoto, S., di Stefano, A., Evans, J., Gambin, T., Gauci, R., Mastroruzzi, G., Monaco, C., Scicchitano, G., 2015. Boulder accumulations related to extreme wave events on the eastern coast of Malta. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3: 5977-6019.
- Cañellas, B., 2010. Long-term extreme wave height events in the Balearic Sea: characterization, variability and prediction. Tesis doctoral, Universitat de les Illes Balears, 84 p.
- Carcavilla, L., López-Martínez, J., Durán, J.J., 2007. Patrimonio geológico y geodiversidad: investigación, conservación, gestión y relación con los espacios naturales protegidos. *Intituto Geológico y Minero de España. Serie Cuadernos del Museo Geominero*, 7, 360 p.
- Ciavola, P., Ferreira, O., Haerens, P., van Koningsveld, M., Armaroli, C., Lequeux, Q., 2011. Storm impacts along European coastlines. Part 1: the joint effort of the MICORE and ConHaz Projects. *Environmental Science & Policy*, 14: 912-923.
- Cortaza, P., de Waele, J., 2012. Geomorphosites and Natural Hazards: Teaching the Importance of Geomorphology in Society. *Geoheritage*, 4: 195-203.
- Dunbar, P.K., 2007. Increasing public awareness of natural hazards via the Internet. *Natural Hazards*, 42 (3): 529-536.
- Duque-Macías, J. Giménez-García J., Rodríguez A., 2017. La "Associació de Geòlegs de les illes Balears" (AGEIB) y el Patrimonio geológico del archipiélago balear En: *Patrimonio geológico, gestionando la parte abiótica del patrimonio natural*, (L. Carcavilla, J. Duque-Macías, J. Giménez, A. Hilarrio, M. Monge-Ganuzas, J. Vegas, A. Rodríguez, Eds), *Cuadernos del Museo Geominero*, 21: 239-246.
- Durand-Delga, M., Rangheard, Y., 2013. Structure de l'île d'Eivissa (Ibiza) et sa place dans le cadre baléare. *Bolletí Societat Història Natural Balears*, 56: 25-50.
- Engel, M., May, S. M., 2012. Bonaire's boulder fields revisited: Evidence for Holocene tsunami impact on the Lee-ward Antilles. *Quaternary Science Reviews*, 54: 126-141.
- Etienne, S., Paris, R., 2010. Boulder accumulations related to storms on the south coast of the Reykjanes Peninsula (Iceland). *Geomorphology*, 114: 55-70.
- Feuillet T., Sourp E., 2011. Geomorphological Heritage of the Pyrenees National Park (France): Assessment, Clustering, and Promotion of Geomorphosites. *Geoheritage*, 3: 151-162.
- Fontseré, E., 1918. Notas sueltas de sismología Balear. *Publicaciones de la Sección de Ciencias Naturales*, Facultad de Ciencias, Universidad de Barcelona, 67: 5-12.
- Furlani, S., Pappalardo, M. Gómez-Pujol, Ll., Chelli, A., 2014. The rock coast of the Mediterranean and Black seas. *Geological Society, London*, 40: 89-123.
- García-Cortés, A., Carcavilla, L., Díaz-Martínez, E., Vegas, J., 2014. Documento metodológico para la elaboración del inventario español de lugares de interés geológico (IELIG). Instituto Geológico y Minero de España, 64 p.
- García-Cortés, A., Fernández-Gianotti, J., 2005. Estrategia del Instituto Geológico y Minero de España para el estudio y protección del Patrimonio Geológico y la Geodiversidad. En: *Geociencias, recursos y patrimonio geológicos*, (M.A. Lamolda, Ed.). Instituto Geológico y Minero de España, Serie Geología y Geofísica, 3: 59-72.
- Goto, K., Okada, K., Imamura, F., 2009. Characteristics and hydrodynamics of boulders transported by storm waves at Kudaka Island, Japan. *Marine Geology*, 262: 14-24.
- Imamura, F., Goto, K., Ohkubo, S., 2008. A numerical model for the transport of a boulder by tsunami. *Journal of Geophysical Research*, 113(7): 1-12.
- Kelletat, D., Whelan, F., Bartel, P., Scheffers, A., 2005. New Tsunami evidences in Southern Spain Cabo de Trafalgar and Mallorca Island. En: *Geomorfologia Litoral i Quarternari, Homenatge al professor Vincenç M. Rosselló i Verger*, (E. Sanjaume, J.F. Matheu, Eds). Universitat de València, Spain: 215-222.
- Leroy, S.A., 2006. From natural hazard to environmental catastrophe: past and present. *Quaternary International*, 158: 4-12.
- Margiotta, S., Sanso, P., 2014. The Geological Heritage of

- Otranto–Leuca Coast (Salento, Italy). *Geoheritage*, 6: 305-316.
- Mas, G., 2015a. El marès de Campos: patrimoni cultural i natural. *I Jornades d'Estudis Locals de Campos*, 2011. Campos 29-30 d'abril de 2011, Ajuntament de Campos-Mancomunitat Migjorn Mallorca: 47-65.
- Mas, G., 2015b. El Nummulític de Consolació. Un lloc d'interès geològic (LIG) al municipi de Santanyí. *I Jornades d'Estudis Locals de Santanyí, Santanyí: llengua, terres i gent*. S'Alqueria Blanca, 2014, Ajuntament de Santanyí: 77-90.
- Mas, G., 2017. La piedra de marès de Mallorca, patrimonio natural y cultural En: *Patrimonio geológico, gestionando la parte abiótica del patrimonio natural*, (L. Carcavilla, J. Duque-Macías, J. Giménez, A. Hilario, M. Monge-Ganuzas, J. Vegas, A. Rodríguez, Eds), *Cuadernos del Museo Geominero*, 21: 413-420.
- Mas, G., Austadillo, H., 2017. Patrimonio paleontológico inmaterial de las islas Baleares. En: *Patrimonio geológico, gestionando la parte abiótica del patrimonio natural*, (L. Carcavilla, J. Duque-Macías, J. Giménez, A. Hilario, M. Monge-Ganuzas, J. Vegas, A. Rodríguez, Eds), *Cuadernos del Museo Geominero*, 21: 421-428.
- Mas, G., Martorell, J., 2011. Un nou lloc d'interès geològic per al patrimoni natural de Manacor: Propostes d'ús didàctic i de geoconservació. *VI Jornades d'Estudis Locals de Manacor, 2010. Manacor: Fets i protagonistes*, Ajuntament de Manacor: 85-111.
- Mas, G., Perelló, D., 2015. Un nou lloc d'interès geològic (LIG) per al patrimoni natural d'Inca. *XV Jornades d'Estudis Locals d'Inca, 2014*, Ajuntament d'Inca: 71-83.
- Mas, G., Moragues, L., Mestre, J., Espinosa, M., 2013. El patrimoni geològic de Felanitx (Mallorca). *VI Jornades de Medi Ambient de les Illes Balears. Ponències i Resums*, (G.X. Pons, A. Ginard, D. Vicens, Eds), Societat d'Història Natural de les Balears: 53-55.
- Mateos, R.M., Durán J.J., Robledo P.A., 2011. Marès Quarries on the Majorcan Coast (Spain) as Geological Heritage Sites. *Geoheritage*, 3: 41-54.
- McGranahan, G., Balk, D., Anderson, B., 2007. The rising tide: assessing the risks of climate change and human settlements in low elevation coastal zones. *Environment and Urbanization*, 19: 17-37.
- Morey, B., 2008. El Patrimoni paleontològic del Pleistocè superior marí de Mallorca: catalogació, caracterització, valoració i propostes per a la gestió i conservació. *Bolletí de la Societat d'Història Natural de les Balears*, 51: 227-258.
- Morey, B., Cabanellas M., 2008. Los yacimientos del Pleistoceno marino mallorquín como puntos de control del litoral (estado en que se encuentran y factores que provocan su destrucción). *Territoris*, 7: 69-86.
- Motta, L., Motta, M., 2007. Erratic blocks: from protector beings to geosites to be protected. In: *Myth and Geology*, (L. Piccardi, W.B. Masse, Eds), *Geological Society, London, Special Publications*, 273: 315-327.
- Nott, J., 2003. Tsunami or storm waves? Determining the origin of a spectacular field of wave emplaced boulders using numerical storm surge and wave models and hydrodynamic transport equations. *Journal of Coastal Research*, 19: 348-356.
- Nozal, F., Montes, M., Díaz de Neira, J.A., Sevillano, A., Rodríguez-García, A., 2015. Cartografía geomorfológica en el Dominio Público Marítimo-Terrestre. *Geo-Temas*, 15: 121-124.
- Obrador, A., 2013. Propostes de gestió del patrimoni geològic de Menorca. Jornades sobre els 20 anys de la Reserva de biosfera de Menorca. *Col·lecció Recerca*, Insitut Menorquí d'Estudis, 22: 291-303.
- Poch, J., Quintana, R., Marí, S., Juaneda, J., Orfila, J., 2013. La Reserva de la Biosfera de Menorca estrena un modelo de gestión del patrimonio geológico para entrar en la Red de Geoparques. En: *Patrimonio geológico, un recurso para el desarrollo*, (J. Vegas, A. Salazar, E. Díaz-Martínez, C. Marchán, C., Eds), *Cuadernos del Museo Geominero*, 15: 121-130.
- Pons, G. X., Vicens, D., Mir-Gual. M., 2017a. Aproximación al inventario de yacimientos del cuaternario en el litoral de Menorca (illes Balears) En: *Patrimonio geológico, gestionando la parte abiótica del patrimonio natural*, (L. Carcavilla, J. Duque-Macías, J. Giménez, A. Hilario, M. Monge-Ganuzas, J. Vegas, A. Rodríguez, Eds), *Cuadernos del Museo Geominero*, 21: 75-80.
- Pons, G. X., del Valle, L., Vicens, D., Mir-Gual. M., 2017b. Yacimientos paleontológicos del cuaternario en el litoral de las islas Pitiusas: aproximación al inventario de las islas de Eivissa y Formentera En: *Patrimonio geológico, gestionando la parte abiótica del patrimonio natural*, (L. Carcavilla, J. Duque-Macías, J. Giménez, A. Hilario, M. Monge-Ganuzas, J. Vegas, A. Rodríguez, Eds), *Cuadernos del Museo Geominero*, 21: 81-86.
- Rodríguez, A., de Pablo, F., Marí, S., Solà, J., Juaneda, J., Orfila, J.L., 2015. Valorización de la geodiversidad en el marco de la Reserva de la Biosfera de Menorca. En: *Patrimonio geológico y geoparques, avances de un camino para todos*, (A. Hilario, M. Mendia, M. Monge-Ganuzas, E. Fernández, J. Vegas, A. Belmonte, Eds), *Cuadernos del Museo Geominero*, 18: 293-298.
- Rodríguez, A., Gelabert, B., de Pablo, F., 2017. Paisaje y geología: un proyecto de geoconservación centrado en la geodiversidad insular. En: *Patrimonio geológico, gestionando la parte abiótica del patrimonio natural*, (L. Carcavilla, J. Duque-Macías, J. Giménez, A. Hilario, M. Monge-Ganuzas, J. Vegas, A. Rodríguez, Eds), *Cuadernos del Museo Geominero*, 21: 477-496.
- Roger, J., Hébert, H., 2008. The 1856 Djielli (Algeria) earthquake and tsunami source parameters and implications for tsunami hazard in the Balearic Islands. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8: 721-731.
- Roig-Munar, F.X., 2016. Blocs de tempesta i tsunami a les costes rocoses de les Illes Balears. Anàlisi geomorfològica i morfomètrica. Tesis doctoral, Departament de Geodinàmica i Geofísica, Universitat de Barcelona, 410 p.
- Roig-Munar, F.X., Rodríguez-Perea, A., Martín-Prieto, J.A., Vilaplana, J.M., Gelabert, B., 2015. Morfometría de bloques de tsunami en las costas rocosas del Este de Mallorca (Islas Baleares). *VIII Jornades de Geomorfologia litoral*, (G. Málvarez, F. Navas, E. Guisado, Eds), *Geo-Temas*, 15: 229-232.
- Roig-Munar, F.X., Martín-Prieto, J.A., Vilaplana, J.M., Rodríguez-Perea, A., Gelabert, B., 2016a. Presencia de bloques de tsunamis en acantilados de Punta Prima (Formentera). En: *Comprendiendo el relieve: del pasado al futuro*, (J.J. Durán, M. Montes Santiago, A. Robador, Á. Salazar, Eds), Instituto Geológico y Minero de España, 571-578.
- Roig-Munar, F.X., Rodríguez-Perea, A., Martín-Prieto, J.A., Vilaplana, J.M., Gelabert, B., 2016b. El uso de bloques de tormenta y de tsunami como materia prima en las islas Baleares. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 29 (2): 79-88.

- Roig-Munar, F.X., Vilaplana, J.M., Rodríguez-Perea, A., Martín-Prieto, J.A., Gelabert, B., 2016c. Indicadores geomorfológicos de tsunamis históricos en las costas rocosas de Baleares. *Geo-Temas*, 16 (1): 641-64.
- Roig-Munar, F.X., Martín-Prieto, J.A., Rodríguez-Perea, A., Gelabert Ferrer, B., Vilaplana Fernández, J.M., 2017a. Morfometría y dinámica de bloques asociados a tsunami en una rampa litoral del Norte de Menorca (Illes Balears). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 30(1): 97-111.
- Roig-Munar, F.X., Martín-Prieto, J.A., Rodríguez-Perea, A., Gelabert, B., Vilaplana, J.M., 2017b. Presencia de bloques de tsunami en los acantilados de Punta Gavina (Formentera, Illes Balears). *Geo-Temas*, 17: 240-244.
- Roig-Munar, F.X., Mata Leonard, R., Rodríguez-Perea, A., Martín-Prieto, J.A., Vilaplana, J.M., Gelabert Ferrer, B., 2017c. Propuesta de Lugares de Interés Geológico asociados a bloques y cordones de origen tsunamítico en la costa SE de Menorca (Baleares). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 30(1): 31-40.
- Sahal, A., Roger, J., Allgeyer, S., 2009. The tsunami triggered by the 21 May 2003 Boumerdès-Zemmouri (Algeria) earthquake: field investigations on the French Mediterranean coast and tsunami modelling. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9: 1823-1834.
- Sansò, P., Margiotta, S., Mastronuzzi, G., Vitale, A., 2015. The Geological Heritage of Salento Leccese Area (Apulia, southern Italy). *Geoheritage*, 7: 85-101.
- Scheffers, A., Kelletat, D., 2003. Sedimentologic and geomorphic tsunami imprints worldwide - a review. *Earth-Science Review*, 63: 83-92.
- Scheffers, A., Kinis, S., 2014. Stable imbrication and delicate/unstable settings in coastal boulder deposits: Indicators for tsunami dislocation?. *Quaternary International*, 332: 73-84.
- Scheffers, A., Scheffers, S., 2006. Documentation of Hurricane Ivan on the Coastline of Bonaire. *Journal of Coastal Research*, 22: 1437-1450.
- Switzer, A.D., Burston, J.M., 2010. Competing mechanisms for boulder deposition on the southeast Australian coast. *Geomorphology*, 114: 42-54.
- Wesley, A., Pforr, C., 2010. The governance of coastal tourism: unraveling the layers of complexity at Smiths Beach, Western Australia. *Journal of Sustainable Tourism*, 18(6): 773-792.
- Zhao, X., Chen, Y., Huang, Z., Gao, Y., 2017. A numerical study of tsunami wave run-up and impact on coastal cliffs using a CIP-based model. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17: 641-655.

MANUSCRITO RECIBIDO EL 22-8-2017

RECIBIDA LA REVISIÓN EL 24-1-2018

ACEPTADO EL MANUSCRITO REVISADO EL 2-2-2018