



**Análisis morfométrico de bloques de tsunami en la isla de Formentera,
islas Baleares**

*Morphometric analysis of tsunami boulders on the island of Formentera,
Balearic island*

Roig-Munar, F.X.⁽¹⁾; Martín-Prieto, J.A.⁽¹⁾; Rodríguez-Perea, A.⁽²⁾;
Gelabert Ferrer, B.⁽³⁾ y Vilaplana Fernández, J.M.⁽⁴⁾

⁽¹⁾ Consultor ambiental. C/ Carritxaret 18-6, es Migjorn Gran, Menorca, 07749 e-mail: xiscoroig@gmail.com

⁽²⁾ Dpto. de Geografía, Universitat de les Illes Balears, Carretera de Valldemossa, km 7,5, 07122,
Palma de Mallorca, Illes Balears.

⁽³⁾ Dpto. de Biología, Universitat de les Illes Balears, Carretera de Valldemossa, km 7,5, 07122,
Palma de Mallorca, Illes Balears.

⁽⁴⁾ Grup RISK NAT; Dpto. de Dinàmica de la Terra i de l'Oceà; Facultat de Ciències de la Terra;
Universitat de Barcelona; Martí i Franquès s/n 08028 Barcelona

Resumen

Se caracterizan morfométricamente 86 bloques de grandes dimensiones ubicados sobre dos áreas de la isla de Formentera y los islotes de s'Espardell y s'Espalmador. Estos bloques se encuentran ubicados sobre acantilados verticales correspondientes a plataformas calcáreas del Mioceno y del Cuaternario. Las áreas analizadas presentan diferentes agrupaciones de bloques, tanto depositados individualmente como en cordones imbricados y asociados todos, a un área fuente bien definida de donde estos bloques fueron arrancados. Los bloques presentan un peso medio de 9,93 Mg, y se encuentran ubicados a una distancia media de la cornisa del acantilado de 54,3 m. La orientación de los bloques presenta una media de 190°, coincidiendo con la simulación de las trayectorias y sus refracciones de los tsunamis generados en el N de África. Se han calculado los valores hidrodinámicos necesarios para el arranque y desplazamiento de estos bloques bajo diferentes supuestos: bloques sumergidos, bloques delimitados por juntas y bloques subaéreos, obteniendo las columnas de agua necesarias para su desplazamiento. El tamaño de los bloques, su disposición, distancia del acantilado, orientación y los valores de las columnas de agua necesarias para su desplazamiento (run-up) nos permite identificar dichos bloques como sedimentos asociados a tsunamis procedentes del N de Argelia.

Palabras clave: Islas Baleares; Formentera; tsunamis; costa rocosa; bloques



Abstract

86 boulders of large size, located on two areas of the island of Formentera and the islets of s'Espardell and s'Espalmador are characterized morphometrically. These boulders are located on vertical cliffs corresponding to calcareous platforms of the Miocene and Quaternary. The analyzed areas present different clusters of blocks: both individually deposited and in imbricated ridges and all are associated to a defined source area from where these blocks were uprooted. The blocks have an average weight of 9.93 Mg, and are located at a medium distance from the cliff edge of 54.3 m. The orientation of the blocks presents an average of 190°, coinciding with the simulation of the trajectories and their refractions of the tsunamis generated in the N of Africa. The hydrodynamic values required for starting and displace of these blocks have been calculated under different assumptions: submerged blocks, blocks delimited by joints and subaerial blocks, obtaining the columns of water necessary for their displacement. The size of the blocks, their arrangement, and their distance from the cliff edge, orientation and the values of the columns of water (run-up) necessities for their displacement allow us to identify these blocks as sediments associated with tsunamis coming from the N of Algeria.

Keywords: Balearic Islands; Formentera; tsunamis; rocky coast; boulders

1. Introducción

Las costas rocosas pueden actuar como entornos de deposición para una amplia gama de tamaños de sedimentos desde arena hasta bloques (Trenhaile, 2005). Existe la evidencia creciente que las costas rocosas son también sensibles a eventos de alta energía (Ciavola *et al.*, 2011), como tormentas (Suárez *et al.*, 2009), 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 (Pignatelli *et al.*, 2010; Engel y May, 2012; Biolchi *et al.*, 2015; Roig-Munar, 2016). Hasta hace poco había escasos ejemplos documentados de bloques claramente desplazados por tsunamis históricos (Goff *et al.*, 2006; Paris *et al.*, 2009) y sus interpretaciones y orígenes fueron muy controvertidos (Dawson *et al.*, 2008) ya que las diferencias sedimentarias entre tsunami y tormentas eran mal interpretadas, sin establecer criterios definitivos para su diferenciación.

La identificación de los bloques transportados por tsunami 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 sedimentos (Imamura *et al.*, 2008). La distinción entre ellos se basa en un conjunto de criterios sedimentológicos, morfológicos, cronológicos, estratigráficos y de organización que cabe analizar detalladamente en cada área estudiada (Roig-Munar, 2016). Goto *et al.* (2011) indicaron que la medida de los bloques y sus distribuciones espaciales puede ser utilizada para estimar las velocidades de los flujos de ola generada por tormentas o tsunamis. Los depósitos de bloques imbricados y alineados a lo largo de la costa, ya sea en un solo cordón o en varios cordones superpuestos, son claros indicadores de transporte asociado a tsunami, según Browne (2011), Weiss (2012), Scheffers y Kinis (2014) y Roig-Munar *et al.* (2017). En la última década el debate sobre el transporte de bloques para discernir su origen entre tsunami versus temporales ha obligado a considerar con más detalle el papel de la tormenta sobre las costas rocosas (Etienne y París, 2010; Switzer y Burston, 2010; Roig-Munar *et al.*, 2017). En este sentido se han desarrollado ecuaciones que permiten estimar las alturas de agua necesarias sobre un bloque, bajo tres supuestos; bloques sumergidos, bloques subaéreos, y bloques delimitados por juntas

o fracturas (Nott, 2003; Barbano *et al.*, 2010, Pignatelli *et al.*, 2010; Engel y May, 2012).

En el Mediterráneo oriental se han realizado estudios de bloques de grandes dimensiones sobre las costas rocosas del Sur de Italia (Barbano *et al.*, 2010; Mastronuzzi y Pignatelli, 2012;), en Grecia (Scheffers y Scheffers, 2007), en Egipto (Dalal y Torab, 2013), en Argelia (Maouche *et al.*, 2009) y en Malta (Biolchi *et al.*, 2015). Las conclusiones de estos estudios varían en la atribución de los agentes que dieron lugar al arranque y deposición de los bloques condicionados por la distancia de estos en relación a la línea de costa y su altura s.n.m. En las costas rocosas del Mediterraneo occidental se han analizado bloques en las costas de Francia (Shah-Hosseini *et al.*, 2013) y en las islas Baleares, donde Kelletat *et al.* (2005) y Scheffers y Kelletat (2003) analizaron bloques de tsunami en Mallorca, posteriormente Roig-Munar *et al.* (2014, 2015, 2016 a y b, 2017) los ampliaron a todo el archipiélago, asociándolos a diferentes fuentes tsunamigénicas que impactan en las islas Baleares (Roger y Hébert, 2008; Álvarez-Gómez *et al.*, 2010, 2011). El estudio de bloques de tsunami en Formentera han sido estudiados mediante análisis morfométricos en Punta Prima y Punta Gavina respectivamente (Roig-Munar *et al.*, 2016a, 2017). En Punta Gavina, fueron ya citados por Nozal *et al.*, (2015).

2. Objetivos y área de estudio

El objetivo de este trabajo se centra en el análisis morfométrico de 86 bloques de grandes dimensiones situados en la costa rocosa de cuatro emplazamientos, dos en la isla de Formentera, uno en el islote de s'Espalmador y otro en el islote de s'Espardell (Figura 1). El estudio se propone comprobar la hipótesis que estos bloques de grandes dimensiones fueron depositados por eventos de tsunami procedentes del N de África, descartando, por la tipología de los bloques y los acantilados, así como por el tipo de sedimentación, procesos

asociados a temporales de gran intensidad. Este estudio completa los trabajos previos realizados por Roig-Munar *et al.* (2016a, 2017) en Formentera ampliándolo a los islotes próximos. Así mismo, este estudio contribuye a mejorar el conocimiento sobre eventos extremos en el Mediterráneo occidental, dando respuesta a las postulaciones de Roger y Hébert (2008), que en su modelización de tsunamis requerían el estudio de la existencia de depósitos de tsunamis en el Mediterráneo occidental, con especial atención en las islas Baleares.

2.1. Características geológicas y geomorfológicas

El área de estudio se centra en la isla de Formentera (Islas Baleares) y su pequeño archipiélago de islotes entre Formentera e Ibiza. Fisiográficamente la isla se encuentra constituida por cuatro dominios diferenciados (Figura 1), en sus extremos oriental y occidental se alzan dos promontorios entre los que se dispone una estrecha franja litoral o cordón dunar de dirección NO-SE, de relieve menos pronunciado. Al N del promontorio occidental se extiende otro cordón de dirección N-S. El promontorio oriental, la Mola, es el más prominente, alcanzando 197 m de altitud en una plataforma suavemente ondulada, con acantilados que sobrepasan los 100 m. El promontorio occidental, de Barberia, alcanza 108 m de altitud que disminuye altimétricamente en sentido NNO. El istmo central, que une ambos promontorios, es una estrecha franja litoral de menos de 2 km de amplio de dirección NO-SE que fue necesario estabilizar mediante siembras en 1945 debido a su gran dinamismo (Mayol, 2006).

Geológicamente Formentera está constituida por un conjunto carbonatado de origen arrecifal depositado durante el Tortoniense. Hacia el NE se le superponen depósitos aluviales, suelos y acumulaciones eólicas (Brebión *et al.*, 1968). Una intensa fracturación bajo un régimen distensivo dio lugar a una densa red

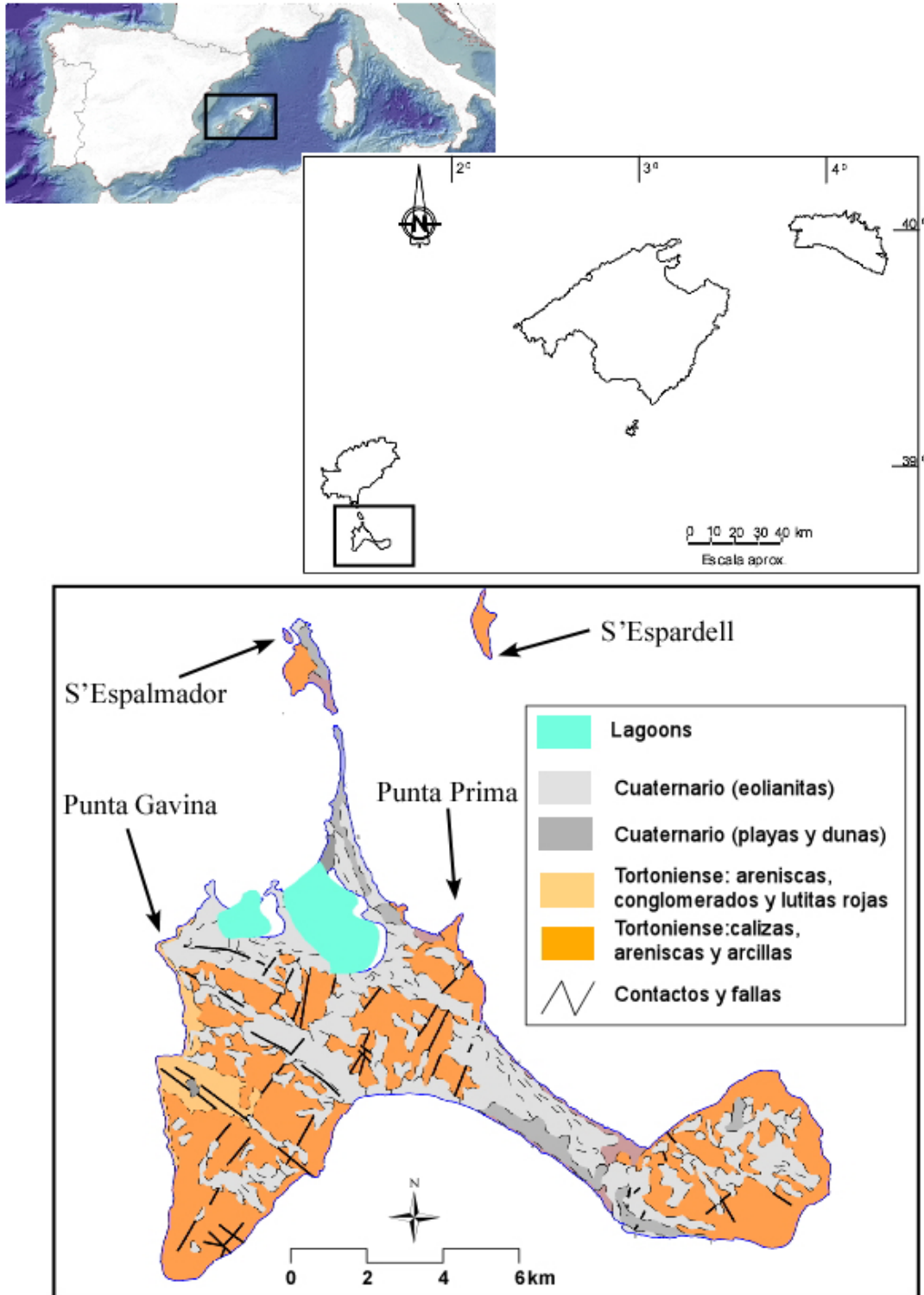


Figura 1. Mapa geológico de Formentera y localización de las 4 áreas de estudio.
Figure 1. Geological map of Formentera and location of the four study areas.

de fallas normales cuyo resultado fue la individualización de los promontorios de la Mola y Barberia (Rangheard, 1984; Giménez *et al.*, 2007; Durand-Delga y Rangeard, 2013). Los materiales miocenos del Tortoniense afloran en buena parte de la costa, poco deformados y mostrando una intensa fracturación, donde las arcillas, arenas, brechas y calizas del Tortoniense constituyen un conjunto heterogéneo. 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 septentrional y Ibiza, constituyendo el archipiélago intermedio entre

ambas islas. Está integrado por los restos emergidos de un umbral parcialmente sumergido y cuya profundidad no alcanza los 10 m. Entre estas islas destacan s'Espalmador y s'Espardell (Figura 1). La fisonomía actual de Formentera se debe en buena medida al destacado papel que han jugado los procesos eólicos, cubriendo con un escaso manto eólico gran parte de los promontorios y dando lugar a la formación de los cordones dunares (Servera, 1997). La influencia marina llega hasta los acantilados más altos, habiéndose observado los efectos del spray marino a cotas elevadas; en las costas mas bajas los efectos son más espectaculares, con presencia de gran-

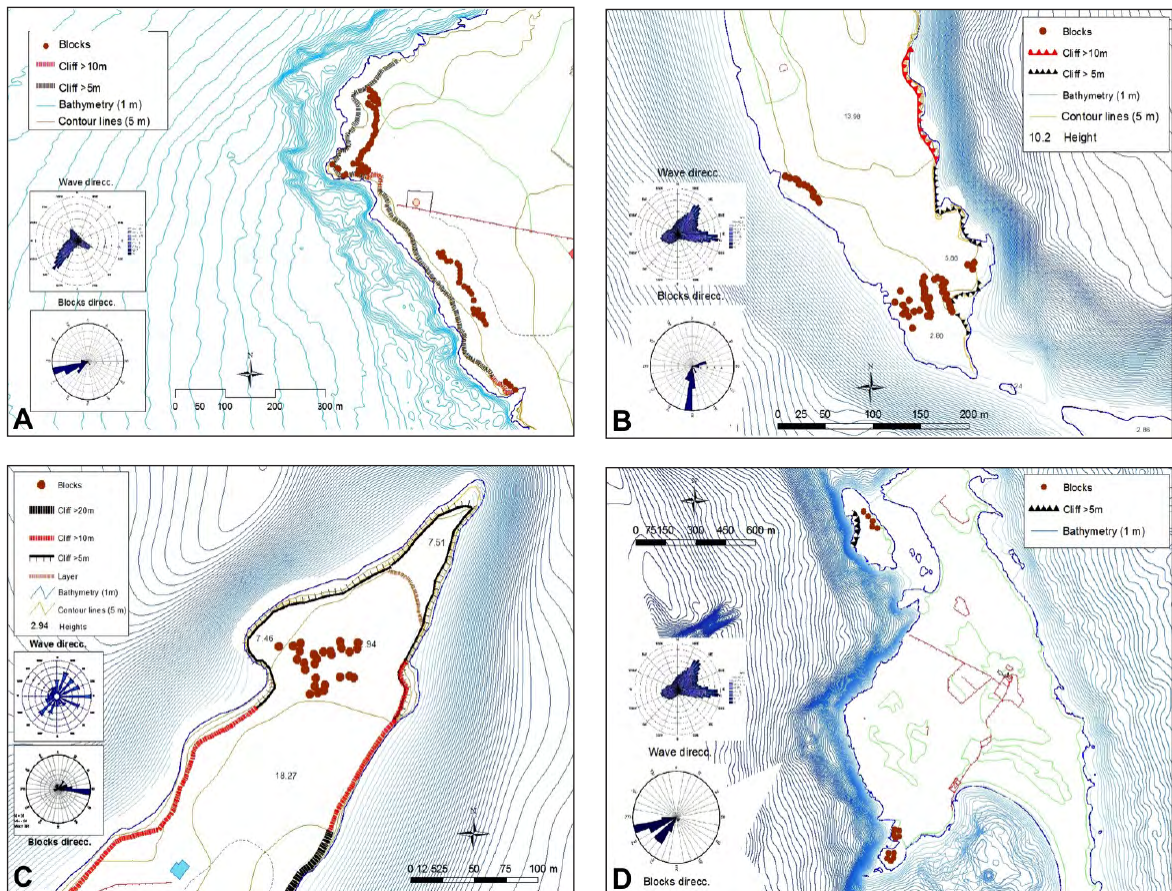


Figura 2. Esquema geomorfológico de las 4 áreas de estudio. A.- Punta Gavina, B.- S'Espardell, C.- Punta Prima y D.- S'Espalmador.

Figure 2. Geomorphologic sketch of the four study areas. A.- Punta Gavina, B.- S'Espardell, C.- Punta Prima and D.- S'Espalmador.

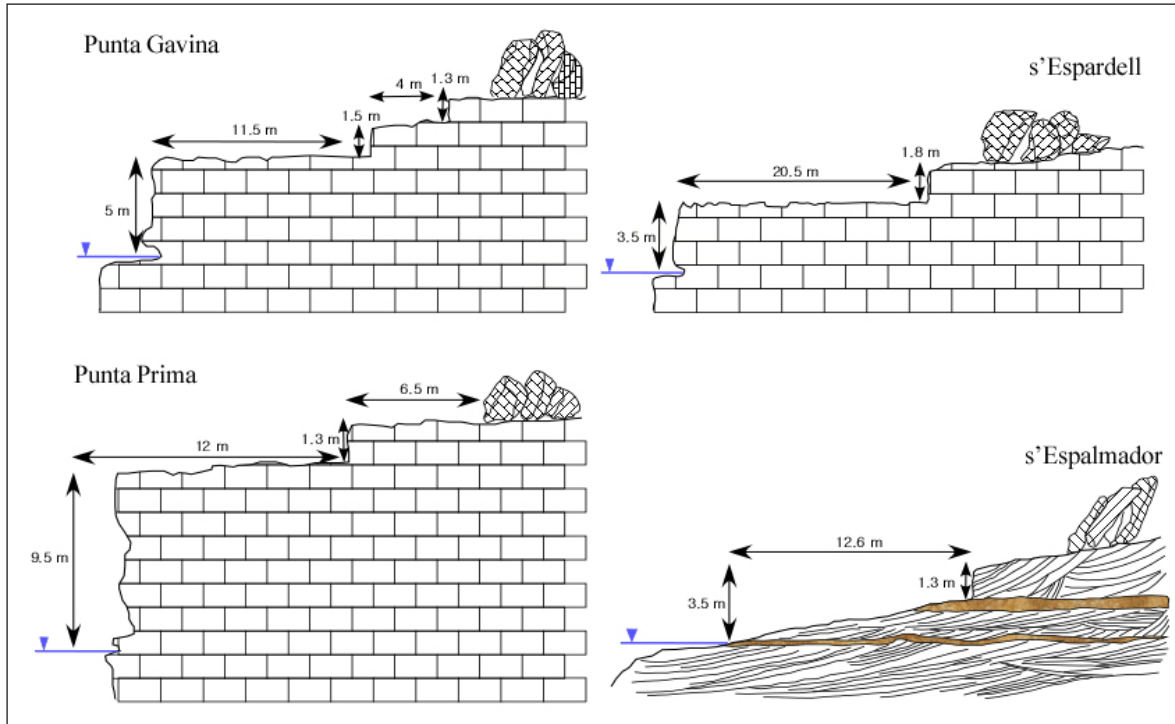


Figura 3. Representación de las cuatro tipologías de costas rocosas asociadas a las cuatro áreas de estudio (Figura 1).

Figure 3. Representation of the four typologies of rocky coasts associated to the four study areas (Figure 1).

des bloques angulosos cuyo emplazamiento es debido a tormentas (Nozal *et al.*, 2015), a procesos gravitacionales por descalce y erosión diferencial de los acantilados 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 en la construcción han desaparecido, como es el caso de las costas rocosas comprendidas entre las playas de Migjorn y Trucadors, que fueron eliminados para su uso y aprovechamiento (Roig-Munar *et al.*, 2016b).

Las 4 áreas de estudio (Figura 1 y 2) se encuentran asociadas a acantilados y plataformas rocosas donde se han depositado bloques que forman agrupaciones y/o cordones imbricados a diferentes alturas y distancias de la línea de costa, llegando hasta 120 m

tierra adentro y hasta 14 m s.n.m (Figura 3 y 4), tal como se puede observar en la Tabla 1. En la Figura 4 se pueden observar los bloques analizados, sobre plataformas rocosas de amplitud variable y donde además existe un elevado grado de fracturación que favorece su formación. Estos bloques son de orden métrico, presentan morfologías de angulosas a sub-angulosas y sus potencias se corresponden con las de las terrazas de denudación del acantilado (Figura 3).

2.1.1. Clima marítimo

La cuenca mediterránea se caracteriza por ser una costa muy recortada con pequeñas subcuencas bien definidas, donde la energía del oleaje está condicionada por la velocidad del viento y por un *fetch* limitado (Lionello y Sanna, 2005). En el Mediterráneo occidental los



Figura 4. Características de los bloques y las áreas analizadas A.- Punta Gavina, presencia de cordones de bloques imbricados sobre una plataforma a 12 m s.n.m. B.- S'Espardell, cordones de bloques imbricados sobre terrazas litorales de hasta 7,5 m s.n.m. C.- Punta Prima, presencia de agrupaciones de bloques sobre una plataforma a 13 m s.n.m. D.- S'Espalmador, agrupaciones de bloques imbricados sobre terrazas litorales de hasta 5,5 m s.n.m.

Figure 4. Characteristics of the boulders and the analyzed areas. A.- Punta Gavina, presence of lines of imbricated boulders on the platform at 12 m.a.s.l. B.- S'Espardell, lines of imbricated Boulder on coastal terraces up to 7,5 m.a.s.l. C.- Punta Prima, presence of clusters of boulders on a platform at 14 m.a.s.l. D.- S'Espalmador, clusters of imbricated boulders on coastal terraces up to 5,5 m.a.s.l.

oleajes más intensos proceden del NE (Sotillo *et al.*, 2005), aunque los temporales del NW también generan fuertes oleajes entre Baleares, Córcega y Cerdeña (Bertotti y Cavaleri, 2008).

A fin de evaluar el régimen del oleaje en la costa de Formentera y estimar la altura de las olas de tormenta, se utilizan los datos ofrecidos por el conjunto REDTEX (medidas procedentes de la red de boyas de aguas profundas), en concreto los Puntos SIMAR 2100104

y 21014106 (www.puertos.es), con una eficacia del 99.67%. El conjunto de datos SIMAR está formado por series temporales de los parámetros de viento y oleaje procedentes de un modelado numérico. Son datos simulados y proceden de la extrapolación de las medidas directas de la Red de Puertos del Estado (www.puertos.es), con una base de registros desde el 1958 hasta la actualidad. Las zonas de estudio se sitúan a oriente y occidente de la isla de Formentera, por lo que el clima ma-

rítmico difiere ligeramente entre ambas, en la dirección del oleaje dominante (Figura 5). Así, tenemos que para Punta Gavina, situada en el costado occidental, el *fetch* máximo es de 500 km hacia el SW y el oleaje se caracteriza por una altura significativa de oleaje (Hs) con una frecuencia de 83,8% inferior a 1 m y un periodo pico (Tp) de 73,7 % inferior a 6 s, y donde tan solo el Hs supera los 6 m en un 0,201%, y siendo la dirección de su componente principal SW, con una frecuencia que alcanza el 25%. Por lo que respecta al resto de zonas de estudio, situadas en el costado oriental, tienen un *fetch* máximo de 900 km hacia el Este. Hs se caracteriza porque el 75,2% es inferior a 1 m, donde tan solo el 0,116% de las veces supera los 6 m. El Tp se caracteriza porque el 63,4% es inferior a 6 s. La componente principal de su dirección es, a diferencia de la otra zona de estudio, 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 entorno los 11 m de altura en el sector oriental procedente del segundo cuadrante y de 7 m en el occidental de Formentera.

2.1.2. Modelizaciones de los tsunamis que impactan en Formentera

A partir del terremoto de Boumerdès-Zemmouri (Argelia), del 21 de mayo de 2003, y que afectó a la costa de las islas Baleares, se han sugerido varios mecanismos de generación y propagación de tsunamis en el N de Argelia con dirección hacia las islas Baleares (Wang y Liu, 2005, Alasset *et al.*, 2006, Roger y Hébert, 2008, Sahal *et al.*, 2009 y Vela *et al.*, 2010). Posteriormente Álvarez-Gómez *et al.* (2010, 2011) modelizaron los tsunamis

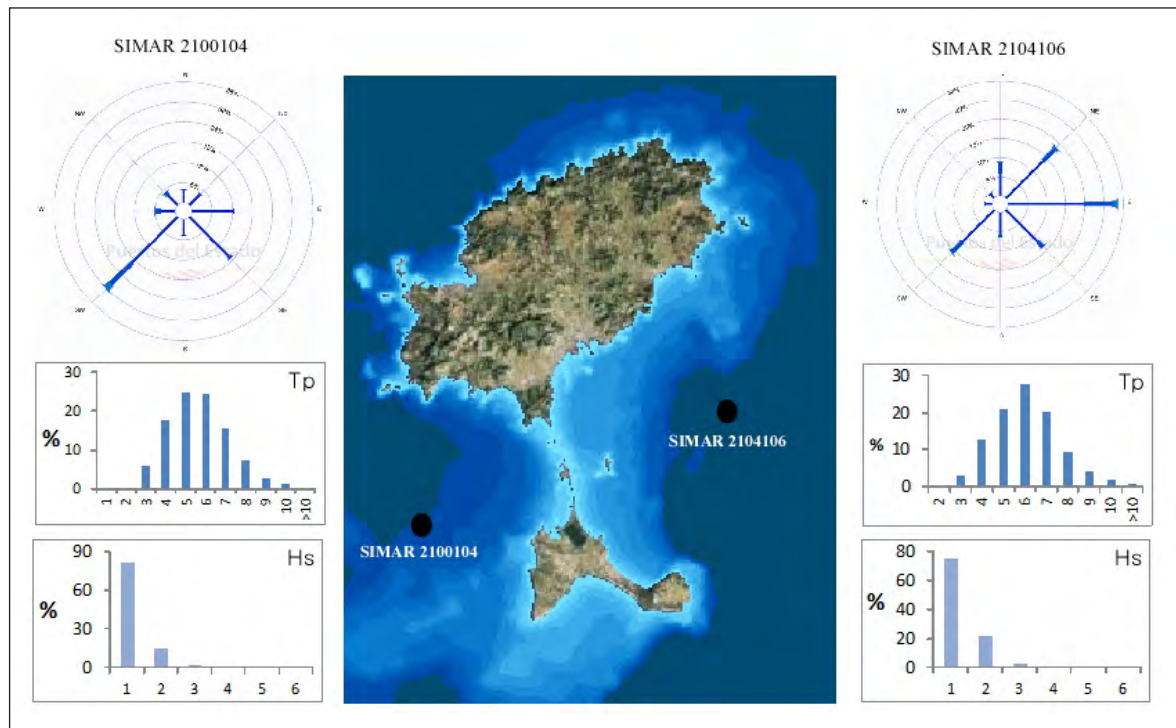


Figura 5. Clima marítimo de la zona de estudio. TP: Período de pico, HS: Altura significativa de oleaje. Fuente: Datos extraídos de Puertos del Estado (www.puertos.es).

Figure 5. Marine weather of the study area. HP: Peak period HS: Significant wave height. Source: Data extracted from State Ports (www.puertos.es).

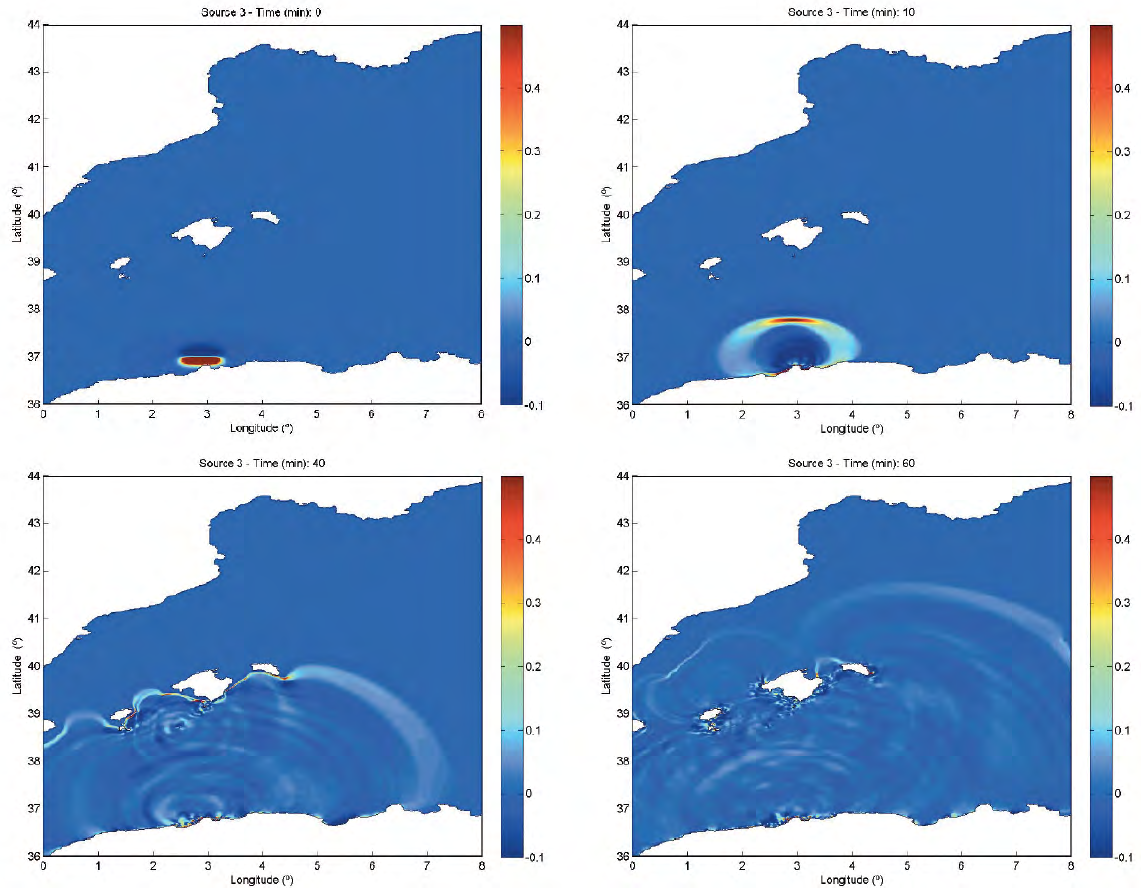


Figura 6. Modelización de las fuentes tsunamigénicas del N de Argelia y el efecto de escudo de las islas Baleares frente la Península Ibérica definidas por Álvarez-Gómez *et al.* (2010).

Figure 6. Modeling of the tsunami sources in the northern Algeria and the shield effect of the Balearic islands and the Iberian Peninsula defined by Álvarez-Gómez *et al.* (2010).

generados en fuentes cercanas a la Península Ibérica y a las islas Baleares, con el objetivo de identificar las áreas de riesgo y las zonas de impacto de tsunamis (Figura 6). Los resultados obtenidos muestran los mapas de elevaciones de ola máxima y de tiempos de viaje del tsunami, a partir de nueve fuentes sísmicas basadas en los terremotos acaecidos en Argelia, los de Al-Asnam, (1980) y Boumerdes-Zemmouri, (2003), como eventos tipo para definir máximos característicos.

Según Álvarez-Gómez *et al.* (2011), las fuentes del N de Argelia S-1 y S-2 (Figura 7) 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 los alrededores del 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. La zona del Cap de Barberia, así como el extremo NE de la isla de Ibiza, concentra las elevaciones más importantes. Un tsunami potencial generado en una de las fuentes S-1, S-2 o S-3 llega a la zona suroriental de Formentera en aproximadamente 30 minutos, y a la isla de Ibiza en poco más de 40 minutos.

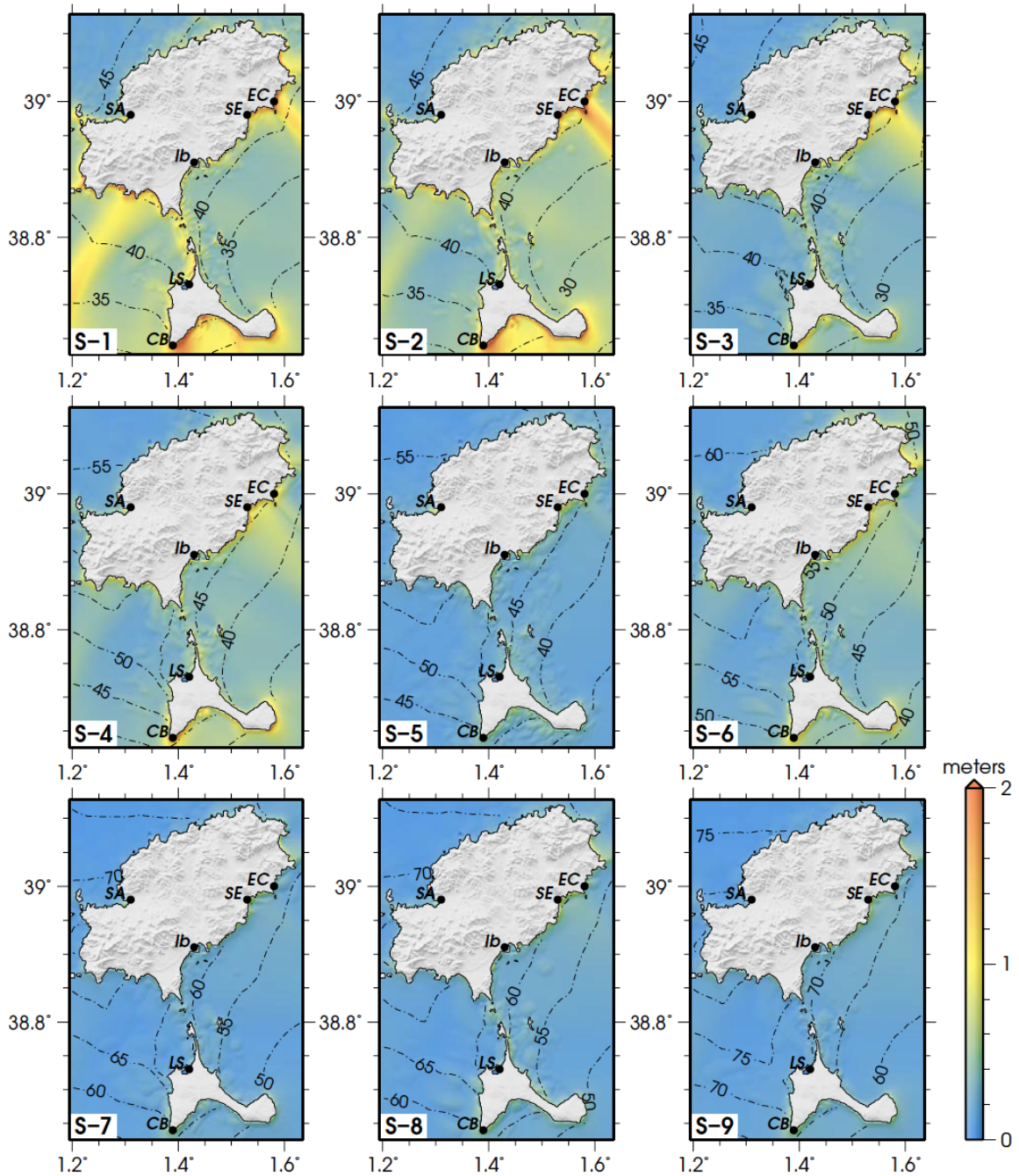


Figura 7. Mapas de elevación de ola máxima y tiempos estimados de viaje del tsunami en las islas de Ibiza y Formentera según las 9 fuentes tsunamigénicas definidas por Álvarez-Gómez *et al.* (2011).

Figure 7. Maximum wave elevation maps and estimated times of tsunami travel in the island Ibiza and Formentera according to the nine tsunami sources defined by Álvarez-Gómez *et al.* (2011).

3. Metodología

Se han caracterizado 86 bloques en las cuatro áreas de estudio (Figura 1). De cada bloque se ha medido el eje máximo (A), el eje intermedio (B) y el eje mínimo (C) para determinar su volumen. Debido a que el producto de $A \cdot B \cdot C$ es una simplificación del volumen del bloque (Robinson *et al.*, 2008), se ha realizado una triangulación de bloques, basada en la metodología de Roig-Munar *et al.* (2015), cuyo resultado promedio reduce los valores volumétricos en un 38%, obteniendo una mayor fiabilidad del volumen real de cada bloque. Para obtener su peso, se han utilizado las densidades en cada área de muestreo. Los resultados obtenidos son de 2,7, correspondiente a la media de 6 muestras tomadas de 2 bloques de las áreas de Punta Prima, Punta Gavina y s'Espardell (Figura 1) formadas por materiales calcáreos del Mioceno arrecifal, y una densidad de 1,89 correspondiente a 2 muestras tomadas en los bloques de materiales calcareníticos del Cuaternario en s'Espalmador.

Se han calculado los valores del *Transport Figure* (TF), de Scheffers y Kelletat (2003) que permite el uso de los parámetros esenciales del bloque (peso, altura y distancia a la costa de cada bloque). Con ello se obtiene un valor numérico y cualitativo que estima la energía necesaria para producir el arranque y transporte de cada bloque. La ecuación (1) consiste en:

$$(1) TF = P \cdot D \cdot H$$

Donde P es el peso del bloque en toneladas, D es la distancia a que se encuentra el bloque respecto de la cornisa del acantilado en metros y H es la altura sobre el nivel del mar, en metros, a la que se encuentra el bloque.

La fórmula aplicada por Scheffers y Kelletat (2003) simplifica las ecuaciones y permite aproximar los límites y las condiciones para discernir la columna de tormenta de una ola de tsunami. Según Scheffers y Kelletat (2003)

en su aplicación del TF en Mallorca, los valores de TF hasta 230 corresponden a bloques de oleaje de tormenta, mientras que los bloques con un $TF > 250$ son el resultado de olas de tsunami. Roig-Munar *et al.* (2015) establecen un valor de $TF > 1.000$ para identificar orígenes tsunamíticos, ya que este valor ofrece más seguridad al establecer un margen superior al considerado por Scheffers y Kelletat (2003) y con una reducción del volumen del bloque en un 38%.

A cada bloque se le han aplicado además, las ecuaciones matemáticas de Nott (2003) y Engel y May (2012) para determinar las columnas de agua necesarias para su transporte. Las ecuaciones permiten calcular los valores hidrodinámicos necesarios para el arranque y desplazamiento de estos bloques bajo tres supuestos: bloques sumergidos, bloques subaéreos y bloques delimitados por juntas y/o fracturas. En este estudio se han aplicado las ecuaciones de Nott (2003) a los bloques sumergidos y las ecuaciones de Engel y May (2012) a los bloques delimitados por juntas y a los bloques subaéreos, ya que esta última ecuación matiza las de Nott (2003), estableciendo un juego de esfuerzos más complejo. Además, estas formulas incorporan la pendiente de la base de cada bloque en contacto con la plataforma, que determinará la energía de arranque o desplazamiento del flujo sobre cada bloque (Pignatelli *et al.*, 2009).

Nott (2003) propone la siguiente ecuación (2):

(2) Bloques sumergidos:

$$Ht = [0,25(\rho_s - \rho_w / \rho_w) 2a] / [(Cd (ac/b^2) + Cl)]$$

$$Hs = [(\rho_s - \rho_w / \rho_w) 2a] / [(Cd (ac/b^2) + Cl)]$$

Donde Ht es la altura de la ola de tsunamis, Hs es la altura de la ola de temporal, ρ_s y ρ_w son las densidades de bloques y del agua del mar, a es el eje largo del bloque, b es el eje medio del bloque y c la potencia de este. Cl coeficiente empírico de elevación, y Cd es el coeficiente de arrastre.

Engel y May (2012) proponen las siguientes ecuaciones (3 y 4) para bloques delimitados por juntas y subaéreos:

(3) Bloques delimitados por juntas o fracturas:

$$Ht = (P_b - P_w) \cdot V \cdot (\cos\theta + \mu \cdot \sin\theta) / 2 \cdot P_w \cdot C_L \cdot a \cdot b \cdot q$$

$$Hs = (P_b - P_w) \cdot V \cdot (\cos\theta + \mu \cdot \sin\theta) / 0.5 \cdot P_w \cdot C_L \cdot a \cdot b \cdot q$$

Donde θ la pendiente de la base del bloque, μ el coeficiente de fricción estimado en 0,65, C_L el coeficiente de sustentación estimado en 0,178 y q un coeficiente del área del bloque, valorado en 0,73, a es el eje mayor de cada bloque, b el intermedio, P_b y P_w son las densidades del bloque y del agua de mar y V el volumen abc corregido.

(4) Bloques subaéreos:

$$Ht = 0,5 \cdot \mu \cdot V \cdot P_b / C_D \cdot (a \cdot c \cdot q) \cdot P_w$$

$$Hs = 2 \cdot \mu \cdot V \cdot P_b / C_D \cdot (a \cdot c \cdot q) \cdot P_w$$

Donde C_D es el coeficiente de arrastre, estimado por estos autores en 1,95, y μ el coeficiente de fricción, a es el eje mayor de cada bloque, c el corto, P_b y P_w son las densidades del bloque y del agua de mar y V el volumen abc corregido.

Un enfoque numérico diferente es el que se utiliza para estimar la distancia máxima de inundación de tsunami (X_{max}). Este parámetro es dependiente de Ht y de la rugosidad de la superficie. Según Pignatelli *et al.* (2009), esta estimación se basa en la distancia tierra adentro donde se encuentra el bloque mayor (D) y en la pendiente de la superficie de la plataforma (α):

$$(5) X_{max} = D + (Ht - hc)^{4/3} \cdot n^{-2} \cdot k \cdot \cos \alpha$$

Donde D es la distancia del bloque de mayor tamaño, Ht la altura de la ola de tsunami al impactar en la costa, hc es la altura del acantilado, n el factor de Manning, k una constante

estimada en 0,06 para la mayoría de tsunamis y α el ángulo de la pendiente de la plataforma.

Para tener una estimación de las columnas de agua necesarias (run-up) para el desplazamiento de los bloques a su posición actual, a los valores obtenidos en las ecuaciones hidrodinámicas anteriores, se les suma el valor real de la cota a la que se encuentra cada bloque s.n.m. Basándonos en las modelizaciones de Zhao *et al.* (2017), podemos estimar el run-up del flujo que arrancó y/o trasladó cada bloque, de igual forma al ya aplicado en el caso de Punta Gavina por Roig-Munar *et al.* (2017).

Los bloques presentan cubetas kársticas (*basin pools* o *basin pans*), pre y post-deposicionales. Son morfologías de disolución indicativas tanto de su situación original, como de su posterior reubicación. La velocidad estimada del desarrollo de dichas morfologías, aplicada a la profundidad de las cubetas post, permite aproximar su datación y nos indican tanto la edad aproximada en que se produjo el transporte del bloque, como el tiempo en que están inmovilizados o se encuentran en su posición actual sin nuevos desplazamientos. Se ha medido la profundidad en mm de 11 cubetas post-deposicionales para aplicar tasas de disolución que permitan su datación (Roig-Munar *et al.*, 2015). A los resultados obtenidos de profundidad de cada cubeta se les aplica una tasa media de disolución anual de 0,3 para disoluciones cársticas litorales de Baleares establecida por Gómez-Pujol (2006).

4. Resultados

4.1. Morfometría y distribución de los bloques

En la Tabla I, podemos observar los valores morfométricos ($A \cdot B \cdot C$) medios de las cuatro áreas analizadas (Figura 1 y 2). El peso medio de los 86 bloques es de 9,58 Mg, se encuentran a una altura media de 8,92 m s.n.m y a una distancia de 54,37 m de la cornisa, con una orientación media de 190°. Si analizamos

los datos morfométricos por áreas considerando la altura media del oleaje máximo registrado (Ho) y la altura del acantilado (Ha), resulta que en las cuatro áreas las olas superan la altura de la cornisa del acantilado, sin embargo los bloques se encuentran muy por encima de la cornisa y de la altura de oleaje, así como a distancias muy superiores de

la influencia de las olas de tormenta. Estos bloques no presentan síntomas morfológicos de abrasión por oleaje ni tampoco presencia de marcas de rozamiento en las plataformas destacando su angulosidad. Tampoco se han localizado perforaciones de fauna marina incrustada o endolítica en ninguno de los bloques analizados.

Tabla I. Valores medios y máximos de los ejes de los bloques; (A, B y C en m), Peso: peso medio de los bloques (en Mg), Dist: distancia y altura media en relación a la línea de costa (en m), Altura: altura de oleaje (Ho) y altura de acantilado (Ha) en m, orientación dominante de los bloques (Ob) (en grados) y orientación de oleaje (Oo).

Table I. Average values of the boulders axis; (A, B and C in meters), Peso: average weight of the boulders (in Mg), Dist: distance and average height in relation to the coastline (in meters), Ho: wave height and Cliff height, in meters, Oo: dominated orientation of the boulders in degrees, and Oo: wave orientation.

| Bloques | N | A | B | C | Peso | Dist | Altura | Ho | Ha | Ob | Oo |
|---------------------------------------|----|------|------|------|-------|-------|--------|-----|-----|-----|-----|
| Valores medios de todos los bloques | 86 | 2,55 | 1,93 | 1,22 | 9,58 | 54,37 | 8,92 | | | 190 | |
| Punta Prima | 27 | 2,23 | 1,74 | 1,19 | 8,42 | 81,89 | 11,7 | 9,9 | 9,5 | 128 | 91 |
| Punta Gavina | 25 | 2,85 | 2,03 | 1,25 | 10,68 | 58,98 | 11,2 | 8,4 | 5 | 242 | 196 |
| S'Espardell | 19 | 2,44 | 1,95 | 1,20 | 9,35 | 34,47 | 5,82 | 9,9 | 4,5 | 161 | 91 |
| S'Espalmador | 15 | 2,79 | 2,10 | 1,27 | 10,11 | 22,37 | 3,95 | 8,4 | 3,5 | 231 | 196 |
| Valores medios de los bloques TF>1000 | 68 | 2,69 | 2,01 | 1,29 | 10,96 | 62,69 | 9,93 | | | 181 | |
| Valores máximos | 86 | 4,2 | 3,85 | 2,5 | 34,11 | 120 | 14 | | | | |

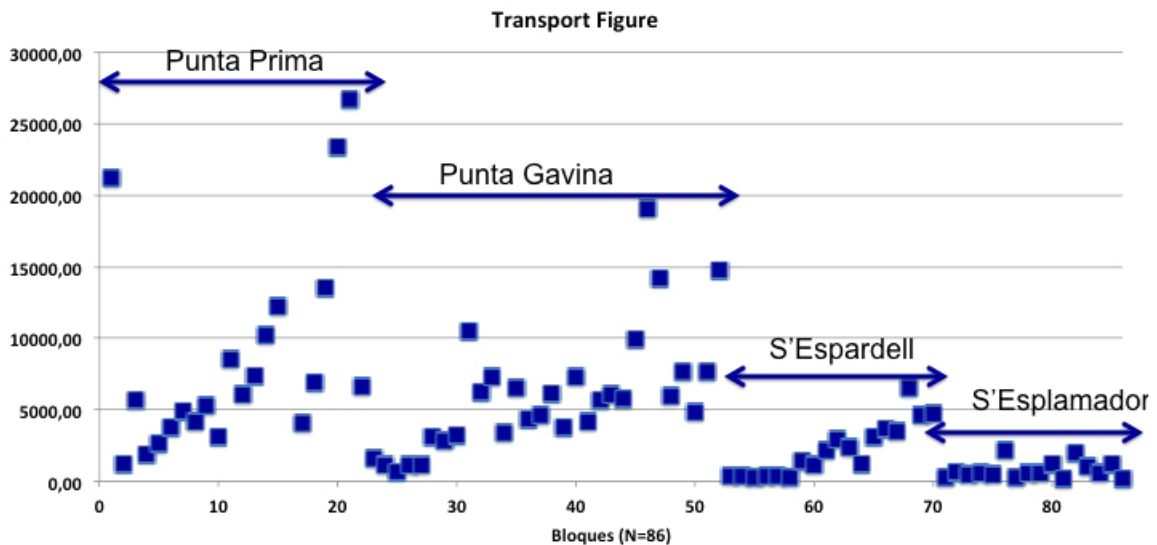
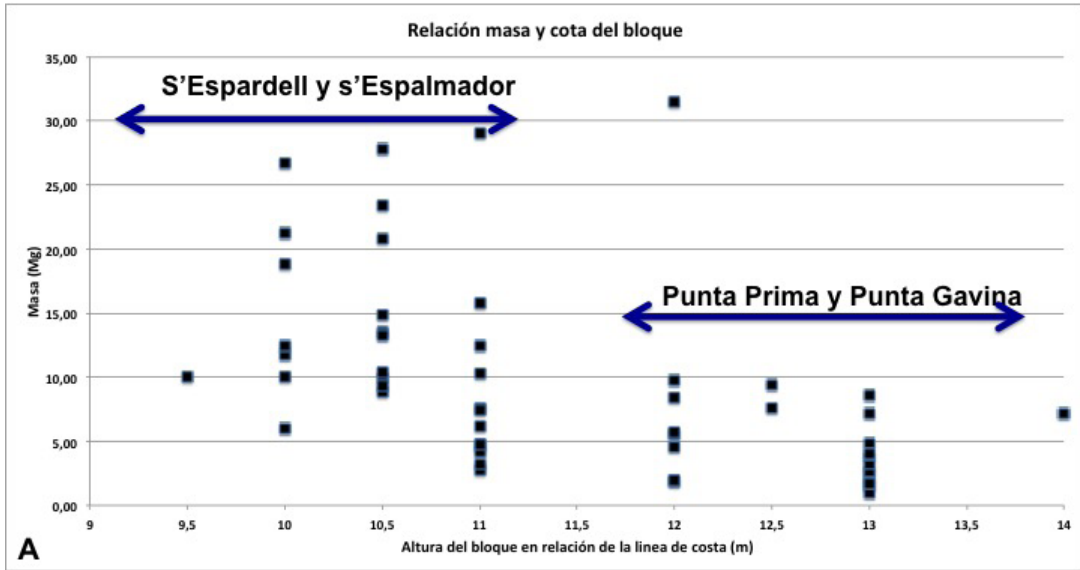
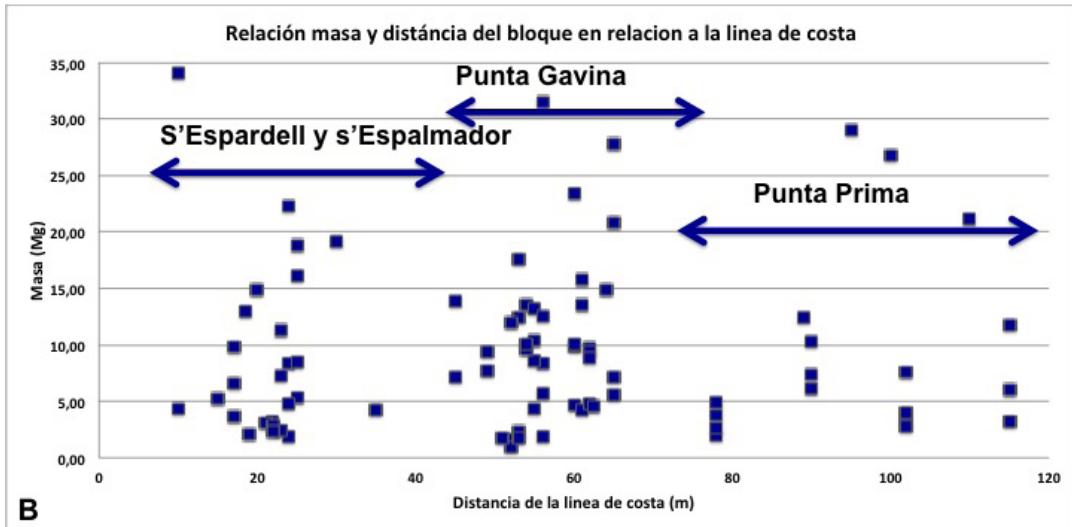


Figura 8. Representación de los valores de Transport Figure de los 86 bloques analizados y representados por áreas.

Figure 8. Representation of the Transport Figure values of the 86 boulders analyzed and represented by areas.



A



B

Figura 9. A.- Distribución de bloques en función de su altura sobre el nivel del mar y su peso y B.- Distribución de bloques en función de la distancia de la costa y su masa.

Figure 9. A. Boulders distribution according to their height above sea level and their weight, and B.- Boulders distribution according to their distance to the coast and their mass.

Tabla II. Valores de TF medios y valores de TF>1000 de cada área.

Table II. Average values of the Transport Figure and values of TF>1000 of each area.

| N | Área | TF medio | TF>1000 medio | % TF>1000 |
|----|--------------|----------|---------------|-----------|
| 27 | Punta Prima | 7.973,6 | 8.255,4 | 96,2 |
| 25 | Punta Gavina | 7.004,6 | 7.004,6 | 100 |
| 19 | S'Espardell | 2.099,5 | 3.129,2 | 68 |
| 15 | S'Espalmador | 812,7 | 1.525,1 | 33 |

Si tomamos de forma individualizada los valores medios de la altura de bloques de cada área en relación a la altura de ola (H_o) y altura de acantilado (H_a), observamos que tan solo los bloques de las islas de s'Espalmador y s'Espardell pueden encontrarse expuestos al embate directo de las olas de temporales (Tabla I), aunque la distancia que estos se encuentran de la cornisa del acantilado y la morfometría de bloques descartan la influencia de temporales sobre estos.

4.2. Transport Figure

Mediante la aplicación de la ecuación del *Transport Figure* (1) obtenemos un valor medio de TF 5145 para los 86 bloques analizados y unos valores por cada área en la que tres superan con creces el $TF > 1000$ (Tabla II). En la Figura 8 se muestra la distribución de los valores del TF que define bien las cuatro áreas muestreadas. Se observa una relación de valores de TF más altos en relación a las alturas de sus acantilados y a las distancias medias a que se encuentran los bloques (Tabla I). Los bloques con $TF > 1000$ son 68 (Tabla II) y presentan dimensiones medias ($A * B * C$) de 2,69, 2,01 y 1,29 m, un peso medio de 10,96 Mg y están ubicados a una distancia media de 62,69 m de la línea de costa y a una altura media de 9,93 m s.n.m., con una orientación media de 181° (Tabla I). Las direcciones medias de los bloques imbricados de las cuatro áreas analizadas coinciden con las direcciones de los tsunamis modelizados por Álvarez-Gómez *et al.* (2010) procedentes del N de África, y correspondientes a las trayectorias S-1 y S-2 definidas por Álvarez-Gómez *et al.* (2010) (Figura 5 y 7).

Si seleccionamos aquellos bloques con valores $TF > 1000$ obtenemos que el 79% de todos los bloques estudiados, superan este valor. Según estos resultados, y basándonos en los valores establecidos por Scheffers y Kelletat (2003) y ampliados por Roig-Munar *et al.* (2015), estaríamos ante un claro escenario de

bloques de tsunami que presentan una tendencia relacionada con la tipología de acantilados de cada área (Figura 3 y 4). En la Tabla II podemos observar los valores absolutos del TF en cada área, los valores de los bloques que superan el $TF > 1000$ y el porcentaje de estos en relación al total de bloques analizados en cada área.

La Figura 9 A y B representa la distribución de los bloques en función de su masa y altura sobre el nivel del mar y también en función de su peso y su distancia a la costa. En la Figura 9A se observan dos agrupaciones de bloques entre las alturas 10 y 11 m (islotas de S'Espardell y S'Espalmador), y entre 12 y 13 m (Punta Prima y Punta Gavina). Esta distribución discrimina las dos áreas de bloques, siguiendo el modelo del perfil de cada área (Figura 3), y observando en las Tablas I y II los valores medios de estas dos agrupaciones de bloques. En la Figura 9B se observa la distribución de los bloques en función de su masa y la distancia. Observamos tres agrupaciones bien definidas, una primera entre 18 y 22 m de distancia, correspondiente a los islotas de s'Espardell y s'Espalmador, una segunda agrupación entre 45 y 65 m de distancia, correspondiente a Punta Gavina, y una tercera entre 80 y 120 m correspondiente a Punta Prima.

Esta distribución está bien definida en relación a las áreas analizadas de bloques y hace necesario considerar las características del oleaje, la batimetría de la zona de estudio y su influencia sobre dicha distribución, ya que las direcciones de los oleajes dominantes no coinciden con la orientación de los bloques (Figura 5). En las áreas de s'Espardell y Punta Prima las orientaciones de oleaje son de 91° y en s'Espalmador y Punta Gavina son de 196° , direcciones que no corresponden a las orientaciones dominantes de los bloques (Tabla I). La tipología de los bloques, su morfometría y su relación con áreas de denudación del acantilado (Figura 4 A), su imbricación, su peso y las distancias a que se encuentran hacen des-

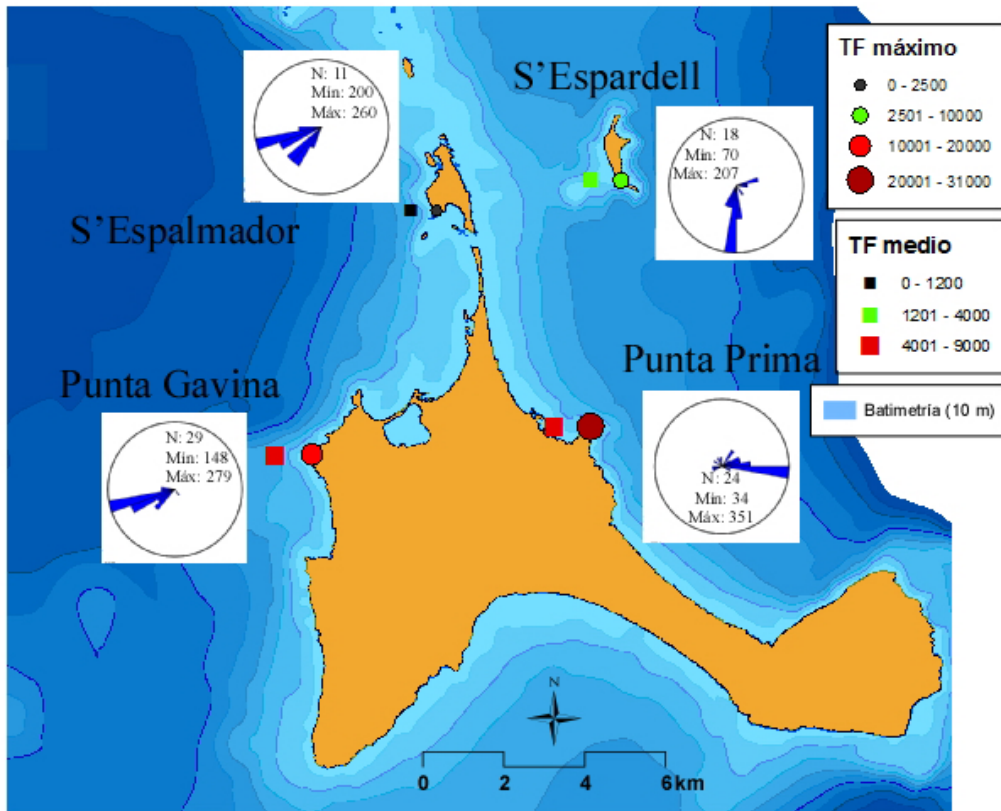


Figura 10. Relación del TF medio, máximo y orientaciones de bloques.

Figure 10. Relation of the average and maximum TF, boulders orientations in the four areas.

cartar una influencia decisiva del oleaje sobre su emplazamiento. En la Figura 10 observamos representado sobre la cartografía del archipiélago de Formentera los valores de TF, donde apreciamos que los valores de $TF > 1000$ superan en todos los casos los valores estimados para considerar los emplazamientos afectados por flujos de tsunamis, este hecho que manifiesta con una correlación negativa entre las orientaciones de bloques y orientaciones dominantes del oleaje en cada sector de la isla de Formentera (Figura 5).

4.3. Estimaciones hidrodinámicas

La aplicación de las ecuaciones hidrodinámicas (2, 3 y 4) representan el valor de la columna de agua que llega a la culminación del

acantilado y que lo rebasa hasta llegar a la base de los bloques para su arranque y desplazamiento (Pignatelli *et al.*, 2009). Una vez que el tsunami llega a la costa podemos tener diferentes escenarios; A) inundación del paisaje sin romperse, como un mar en rápido aumento de su nivel (Pignatelli *et al.*, 2010), o B) el flujo de agua se convierte en un manto de agua turbulenta (Noormets *et al.*, 2004). Para determinar las columnas de agua necesarias para el arranque y transporte de bloques se ha aplicado la ecuación (2) de Nott (2003) en el área de s'Espalmador y s'Espardell, debido a que estas zonas presenta una menor altura de acantilado y cabría la posibilidad del transporte de bloques sumergidos. No obstante, hay que señalar que ninguno de los bloques analizados presenta apariencia de haber estado sometido a ambientes ma-

rinós, no habiéndose identificado síntomas de retrabajamiento por oleaje, fauna marina endolítica, ni restos de morfologías de *notch*. Las ecuaciones (3 y 4) de Engel y May (2012) han sido aplicadas a las cuatro áreas y permiten obtener los órdenes de magnitud de los valores de altura mínima del flujo del oleaje de tormenta (Hs) y de la ola de tsunami (Ht) necesarios para los desplazamientos de los bloques subaéreos y de los bloques delimitados por juntas o fracturas. A los resultados de estas ecuaciones se les suma la altura a que se encuentra cada uno de los bloques sobre el acantilado (Roig-Munar *et al.*, 2015, 2017), obteniendo la columna de agua total necesaria para el desplazamiento de cada bloque y así obtener el run-up (R) de Hs y Ht para cada bloque y bajo los supuestos de bloques sumergidos, arrancados o bloques subaéreos (Zhao *et al.*, 2017).

En la Tabla III se muestran los valores medios de las columnas de agua necesarias de run-up (R) para el traslado de bloques en el caso de oleaje de tormenta (Rs) y en el caso de oleaje de tsunami (Rt). El run-up para el desplazamiento de los bloques siempre es superior cuando el transporte se encuentra relacionado con temporales, ya que se necesitan valores superiores de ola.

En la Figura 11 observamos la representación gráfica de los 86 bloques, donde la altura del run-up (Rs y Rt) para bloques sumergidos en los islotes de s'Espardell y s'Espalmador re-

quieran columnas de agua superiores a los valores medios de oleaje de tormenta que afectan a cada área. Los valores de Rs requeridos para sacar bloques sumergidos también superan la altura media del oleaje de 8,4 y 9,9 m (Tabla I) descritos por Cañellas *et al.* (2007) y Cañellas (2010) en la costa de Formentera. En el caso de los bloques delimitados por juntas las columnas de agua de run-up superan los valores de oleaje en todas las áreas (Rs) (Tabla III). Sin embargo, los valores de Rt presentan valores medios de altura de ola en los dos islotes inferiores a la altura de la cornisa del acantilado, mientras que en las áreas de Formentera las superan con creces. En el caso de bloques subaéreos o arrastrados bajo el supuesto de tormentas o tsunamis, los valores son inferiores debido a que se requiere una menor fuerza de flujo para su transporte y removilización en caso de ubicarse cerca de las cornisas del acantilado.

Para el cálculo del run-in, distancia máxima de inundación (Xmax), mediante la aplicación de la ecuación de Pignatelli *et al.* (2009) (5) se ha utilizado, siguiendo a dichos autores, un número de Manning de 0,05 (costa rocosa karstificada), excepto en s'Espalmador donde la rugosidad es claramente menor (0,045). Se obtienen los siguientes valores: Punta Prima, 219 m; Punta Gavina, 329 m; s'Espardell, 164 m; s'Espalmador, 158 m. Excepto en el caso de Punta Gavina, estos valores significan que el flujo de tsunami sobrepasó el lugar donde encontramos los bloques (Figura 2). En Pun-

Tabla III. Run-ups promedio de los bloques, obtenidos de la aplicación de las ecuaciones de Nott (2003) y Engel y May (2012) a los que se suma la altura s.n.m. a que encontramos cada bloque.

Table III. Average run-ups of the boulders obtained from the application of the equations of Nott and Engels and May to which is added the height above sea level to which we find each boulder.

| | Bloques sumergidos (Nott, 2003) | | Bloques delimitados juntas (Engel y May, 2012) | | Bloques subaéreos (Engel y May, 2012) | |
|--------------|------------------------------------|-------|---|-------|--|-------|
| | Rs | Rt | Rs | Rt | Rs | Rt |
| Punta Prima | | | 22,09 | 14,30 | 13,30 | 12,10 |
| Punta Gavina | | | 22,15 | 13,98 | 13,12 | 11,73 |
| S'Espardell | 16,25 | 12,79 | 16,31 | 8,44 | 7,61 | 6,26 |
| S'Espalmador | 12,88 | 9,15 | 14,34 | 6,55 | 5,71 | 4,39 |

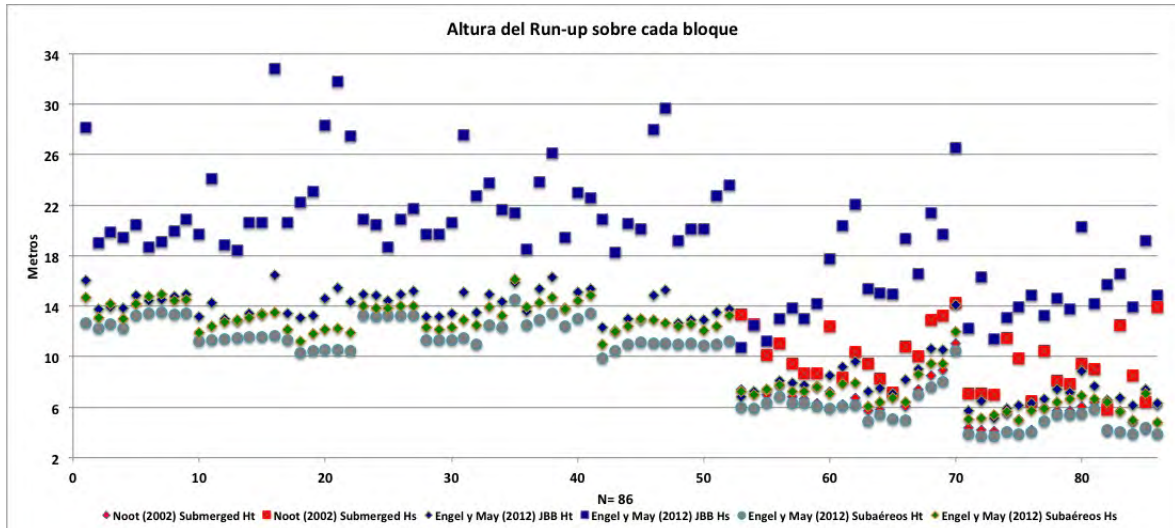


Figura 11. Distribución de bloques en función de la altura del run-up de cada bloque analizado.

Figure 11. Boulders distribution according the run-up height of each analyzed boulder.

ta Gavina, en cambio, el alcance del flujo de inundación podría relacionarse con depósitos de bloques y arenas que situados tierra adentro de los cordones de bloques, se encuentran aún en estudio (Figura 12).

4.4. Morfologías de disolución kárstica pre y post-deposicional

Los valores medios de la profundidad de las cubetas de disolución obtenidos sobre bloques del Mioceno en Punta Prima son de 6,8 cm, con rangos mínimo de 5,4 cm y máximos de 7,4 cm, donde el 80% de los valores representan profundidades superiores a 6,6 cm. Si al valor medio se les aplica las tasas de disolución de 0,3 mm/año estimada por Gómez-Pujol (2006), el resultado obtenido corresponde a eventos acaecidos hace 226 años aproximadamente, 234 años si tomásemos solo los valores superiores a 6,6 cm de profundidad. Estos valores de disolución corresponden a aquellos bloques arrancados y/o desplazados. Los bloques habrían sido desplazados en torno al año 1791 y que coinciden –si consideramos el margen de error en orden de magnitud con la edad con los valores obtenidos por Roig-Munar (2016) en el

análisis de los bloques de origen tsunamítico de la costa SE de Menorca, datados mediante C¹⁴, y cuya datación los sitúa más jóvenes de 1720 ± 65 años (IRPA-KIK, 2014). Esta fecha es coherente con el evento de 1756, registrado en las notas de sismología balear como una “gran ola sísmica” en Santanyí, —municipio del S de Mallorca—, donde las crónicas describen “la entrada de una ola más de media legua tierra adentro, con presencia de peces el bosque, y con el transporte de un bloque de más de 100 quintales” (Fontseré, 1918), es decir, que una ola se adentró alrededor de 2,4 km en la isla y transportó un bloque de unos 10 Mg, similar, aunque de mayor magnitud, al fenómeno documentado en el tsunami que afectó a Menorca en el año 2003 (Roig-Munar *et al.*, 2017).

En el caso de Punta Gavina se han identificado, además, bloques imbricados parcialmente sedimentados por mantos eólicos sobre la plataforma miocénica (Figura 12) a una distancia media de 217 m y una altura s.n.m. de 11,5 m, con una orientación media de los bloques de 254,4°, coincidente con la orientación media dominante de los bloques analizados y no sedimentados (Figura 4 A y Tabla I). Este dato

morfológico nos aporta un dato importante sobre eventos pasados que han dado lugar al desmonte y retroceso de las áreas fuente siguiendo los modelos propuestos por Roig-Munar *et al.* (2016c) en las islas Baleares. Si consultamos las fuentes documentales de los catálogos del Instituto Geográfico Nacional (IGN) de Martínez-Solares y Mezcua-Rodríguez (2002) y Silva y Rodríguez-Pacua (2014), sobre tsunamis en las islas Baleares, tan solo se dispone de información de eventos a partir de 1660, indicando un total de 6 eventos que afectaron al archipiélago a partir de esa fecha. Este moderado número de eventos parece que no ha afectado significativamente a nivel geomorfológico, a diferencia de la documentación existente en otros lugares del Mediterráneo (Papadopoulos, 2002).

5. Discusión y conclusiones

El estudio es un nuevo aporte al conocimiento de eventos masivos extremos en el Mediterráneo occidental, y da respuesta a las postulaciones de Roger y Hébert (2008) que en su modelización de tsunamis procedentes del N de África, concluyen que se requiere comprobar la existencia de depósitos de tsunamis

en el Mediterráneo occidental, con especial atención a las islas Baleares.

Un primer análisis cualitativo sugiere a priori, que los tsunamis son los responsables del arranque y transporte de los bloques, ya que las morfometrías, alturas y distancias son incompatibles con el régimen de olas de tormenta del área estudiada. La clara presencia de un límite de transporte de olas de tormenta en las cuatro áreas y la presencia de vegetación no halina ayuda también a diferenciar cualitativamente bloques depositados por tsunami o tormentas.

Se han considerado varias tipologías de acantilados y diferentes ubicaciones donde las características de los procesos que actúan sobre el acantilado están influenciados por varios factores locales como su ancho de la plataforma continental, donde la energía se ve afectada por los efectos de la batimetría y la geometría local de la costa, donde el impacto de un tsunami o tormenta está muy marcado por la topografía costera y en particular por la morfología litoral.

Los resultados del análisis morfométrico y de disposición de los 86 bloques en las costas rocosas de Formentera y la aplicación de las



Figura 12. Presencia de bloques de grandes dimensiones sedimentados en Punta Gavina, con imbricación y orientación dominante a 254,4º. Se encuentran a 217 m de la cornisa del acantilado y sobre una plataforma tabular de 11,5 m s.n.m.

Figure 12. Presence of large dimension boulders sedimented in Punta Gavina, with overlapping and dominant orientation to 254.4º. They are located 217 m from the ledge of the Cliff and on a tabular platform of 11.5 m.a.s.l.

ecuaciones hidrodinámicas para su arranque y transporte, ponen de manifiesto que los grandes temporales no son capaces de trasladar estos bloques en las ubicaciones actuales.

Los bloques están imbricados, formando agrupaciones y cordones, indicador de flujos de gran energía. Por su disposición actual no pueden considerarse como indicadores de temporales, ya que requieren un flujo de energía muy superior a la del oleaje de temporal. La orientación de los ejes de los bloques presenta un patrón común coincidente con las modelizaciones de las trayectorias de tsunamis. Además, las orientaciones de los bloques no coinciden con las orientaciones dominantes de los oleajes de cada área.

La aplicación de las ecuaciones hidrodinámicas muestran las alturas potenciales de run-up, tanto para tormentas, como para tsunamis, necesarias para mover estos bloques desde su posición original. Sólo los tsunamis son capaces de transportar los bloques analizados ya que requieren olas con periodos más largos y run-ups mayores que los producidos por las tormentas.

El análisis también confirma la importancia del entorno pre-transporte para determinar la altura del run-up requerido para que se produzca transporte. Está relacionado con la estratificación y la fracturación de las rocas de la cornisa que favorecen el desprendimiento de grandes bloques desde el borde del acantilado.

Las dataciones en base a las depresiones kársticas post-transporte, permiten acotar las fechas del evento en torno a 1791, que —con el margen de error considerado— se puede relacionar con uno de los tsunamis históricos reportados en 1756 que afectaron la costa Balear.

El origen de tales tsunamis debería encontrarse, según los modelos propuestos por Álvarez-Gómez *et al.* (2010, 2011), en las fuentes S-1 y S-2, que presentan refracción a lo largo de la línea de la costa, congruente con la orientación de los bloques analizados en las cuatro áreas. Así se descartarían otras hipó-

tesis, como los tsunamis generados por deslizamientos en el litoral catalán que afectaron la isla de Ibiza (Lastras *et al.*, 2007; Iglesias, 2015) en épocas más antiguas.

Por lo tanto, conocemos tsunamis que llegan a las Baleares desde Argelia, el más reciente en el 2003 y se registran situaciones similares a lo largo del Mediterráneo. Además, existe una gran coincidencia entre los modelos de propagación de dichos tsunamis y los lugares donde encontramos los bloques.

En Formentera e islotes adyacentes bloques métricos se encuentran sobre plataformas litorales con evidencias de haber sido arrancados del borde del acantilado y transportados a decenas de metros de él. Aunque en los acantilados más bajos, los bloques se presentan sub angulosos y son compatibles con la abrasión por olas de temporal, muchos de los bloques están a alturas superiores a la altura extrema del oleaje de temporal en la zona en que se encuentran.

Frecuentemente presentan imbricaciones indicadoras de un flujo continuo y las ecuaciones hidrodinámicas exigen sobreelevaciones por remonte (run-ups) que solo parecen compatibles con tsunamis.

La datación de su emplazamiento se establece en base a la edad de formación de morfologías de disolución post-deposicionales (kamenitzas) calculada a partir de tasas medias de disolución establecidas en torno a $0,3 \text{ mm año}^{-1}$ (Gómez, 2006). Una edad en torno a finales del siglo XVIII parece razonable y además, sería compatible con dataciones por radiocarbono en Menorca. Diversas fuentes documentales recogen eventos tsunamíticos en tales márgenes de edad.

Agradecimientos

Al personal del Parque Natural de ses Salines d'Eivissa i Formentera: Núria Valverde y Vicent Forteza, por las autorizaciones de acceso a Punta Gavina y la isla de s'Espardell, así

como facilitarnos datos e imágenes recogidas en la isla de s'Espalmador y otros islotes como Malvins y es Penjats, ubicados entre Formentera e Eivissa. A Toni Box por facilitarnos el acceso en la barca de inspección de pesca del Consell d'Eivissa a la isla de s'Espardell. A Xavier Mas por facilitarnos imágenes de la isla de sa Torreña y s'Espalmador.

Asimismo, los autores quieren agradecer las revisiones realizadas por los dos revisores del trabajo, el Dr. Juan A. Morales González y por otro revisor anónimo, y al editor de la revista, David Regüés Muñoz, ya que sus sugerencias han ayudado de forma considerable a la mejora de este trabajo.

Bibliografía

- Alasset, J. P., Hebert, H., Maouche, S., Calbini, V. y 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. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.02912.x>
- Álvarez-Gómez, J. A., Aniel-Quiroga, I., González, M., y Otero, L. (2011): Tsunami hazard at the Western Mediterranean Spanish coast from seismic sources. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11: 227-240. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-227-2011>
- Álvarez-Gómez, J. A., Olabarrieta, M., González, M., Otero, L., Carreño, E. I Martínez-Solares, J. M. (2010): The impact of tsunamis on the Island of Majorca induced by North Algerian seismic sources. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 19: 367-383. <https://doi.org/10.3906/yer-0812-7>
- Barbano, M. S., Pirrotta, C. y Gerardi, F. (2010): Large boulders along the south-eastern Ionian coast of Sicily: Storm or tsunami deposits? *Marine Geology* 275, 140-154. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2010.05.005>
- Bertotti, L. y Cavaleri, L. (2008): Analysis of the Voyager storm. *Ocean Engineering*, Vol. 35 (1): 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2007.05.008>
- Biolchi, S., Furlani, S., Antonioli, F., Baldassini, N., Causon Deguara, J., Devoto, S., di Stefano, A., Evans, J., Gambin, T., Gauci, R., Mastro-nuzzi, G., Monaco, C. y 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 <https://doi.org/10.5194/nhessd-3-5977-2015>
- Brébion, P., Chevalier, J.P., Colom, G., Lecointre, G. y Rangheard, Y. (1968): Sur le Tortonien de Formentera et d'Ibiza. *C. R. somm. Soc. Géol. Fr.*, 5: 152-153.
- Browne, A. (2011): Coarse coastal deposits as palaeo-environmental archives for storms and tsunamis, PhD thesis, Southern Cross University, Lismore, NSW. 277 pp.
- Cañellas, B. (2010): Long-term extreme wave height events in the Balearic Sea: characterization, variability and prediction. Tesis doctoral, Universitat de les Illes Balears 71 pp.
- Cañellas, B., Orfila, A., Méndez, F. J., Menéndez, M. y Tintoré, J. (2007): Application of a POT model to estimate the extreme significant wave height levels around the Balearic Sea (Western Mediterranean). *Journal of Coastal Research SI*, 50: 329-333.
- Ciavola, P., Ferreira, O., Haerens, P., van Koningsveld, M., Armaroli, C. y Lequeux, Q. (2011): Storm impacts along European coastlines. Part 1: the joint effort of the MICORE and Con-Haz Projects. *Environmental Science & Policy*, 14: 912-923. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2011.05.011>
- Dalal, N. y Torab, M. (2013): Large boulders deposits on the coast of Ras El Hekma, NW coast, Egypt. Storm or tsunami?. The 2nd International Symposium on Kaz Mountains and Edremi, 2-4 May, 2013, Edremi-Balikesir-Turkey.
- Dawson, A. G., Stewart, I., Morton, R. A., Richmond, B. M., Jaffe, B. E. y Gelfenbaum, G. (2008): Reply to Comments by Kelletat (2008) comments to Dawson A.G. and Stewart I. (2007): tsunami deposits in the geological record. *Sedimentary Geology*, 211: 92-93. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2008.09.004>
- Durand-Delga, M. y Rangheard, Y. (2013): Structure de l'île d'Eivissa (Ibiza) et sa place dans le cadre baléare. *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 56: 25-50.
- Engel, M. y 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. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2011.12.011>
- Etienne, S. y Paris, R. (2010): Boulder accumulations related to storms on the south coast of the Reykjanes Peninsula (Iceland). *Geomorphology* 114: 55-70. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.02.008>

- Fontseré, E. (1918): Notas sueltas de sismología Balear. Publicaciones de la Sección de Ciencias Naturales, Facultad de Ciencias de la Universidad de Barcelona, 5-12.
- Giménez, J., Gelabert B. y Sàbat, F. (2007): El relieve de las islas Baleares. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, 2007 (15.2) 175-184.
- Goff, J., Dudley, W. C., Demaintenon, M. J., Cain, G. y Coney, J. P. (2006): The largest local tsunami in 20th century Hawaii. *Marine Geology*, 226: 65-79. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2005.09.017>
- Gómez-Pujol, Ll. (2006): Patrons, taxes i formes d'erosió a les costes rocoses carbonatades de Mallorca. Tesi doctoral inèdita. Departament de Ciències de la Terra, Universitat de les Illes Balears. 200 pp.
- Goto, K., Miyagi, K., Kawana, T., Takahashi, J. y Imamura, F. (2011): Emplacement and movement of boulders by known storm waves — field evidence from the Okinawa Islands, Japan. *Marine Geology* 283: 66-78. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2010.09.007>
- Goto, K., Okada, K. y Imamura, F. (2009): Characteristics and hydrodynamics of boulders transported by storm waves at Kudaka Island, Japan. *Marine Geology* 262: 14-24. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2009.03.001>
- Iglesias, O. (2015): Generación y propagación de tsunamis en el mar catalano-balear. Tesi Doctoral. Universidad de Barcelona. Inèdita, 247 pp.
- Imamura, F., Goto, K. y Ohkubo, S. (2008): A numerical model for the transport of a boulder by tsunami. *Journal of Geophysical Research*, 113-7: 1-12. <https://doi.org/10.1029/2007JC004170>
- IRPA-KIK (2014): Institut Royal du Patrimoni Artistique – Koninklijk Instituut Voor Het Kumstpatrimonium RICH-21442
- Kelletat, D., Scheffers, A. y Scheffers, S. (2005): Tsunami-eine unterschätzte Naturgefahr? - *Geowissenschaftliche Mitteilungen*: 5-13.
- Lastras, G., Canals, M., Amblas, D., Frigola, J., Urgeles, R., Calafat, A. M. y Acosta, J. (2007): Slope instability along the northeastern Iberian and Balearic continental margins. *Geologica Acta*, 5 (1): 35-47. <http://dx.doi.org/10.1344/105.000000308>
- Lionello, P. y Sanna, A. (2005): Mediterranean wave climate variability and its links with NAO and Indian Monsoon. *Climate Dynamics* 25 (6): 611-623. <https://doi.org/10.1007/s00382-005-0025-4>
- Maouche, S., Morhange, C. y Meghraoui, M. (2009): Large Boulder accumulation on the Algerian coast evidence tsunami events in the western Mediterranean. *Marine Geology*, 262: 96-104. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2009.03.013>
- Martínez-Solares, J. M. y Mezcuca-Rodríguez, J. (2002): Catálogo sísmico de la Península Ibérica (880 a. C.-1990). Dirección General del Instituto Geográfico Nacional, pp. 253.
- Mastronuzzi, G. y Pignatelli, C. (2012): The boulder berm of Punta Saguerra (Taranto, Italy): a morphological imprint of the Rossano Calabria tsunami of April 24, 1836?. *Earth Planets Space*, 64: 829-842. <https://doi.org/10.5047/eps.2011.08.018>
- Mayol, J. (2006). Un gran projecte de postguerra: La repoblació forestal de les dunes de Formentera. *Rev. Eivissa*, 44-45: 9-16.
- Noormets, R., Crook, K. A. W. y Felton, E. A. (2004.): Sedimentology of rocky shorelines: 3. Hydrodynamics of megaclast emplacement and transport on a shore platform, Oahu, Hawaii. *Sedimentary Geology* 172: 41-65. [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(04\)00235-0](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(04)00235-0)
- 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., Sevilla, A. y Rodríguez-García, A. (2015): Cartografía geomorfológica en el Dominio Público Marítimo-Terrestre. *Revista Geo-Temas*, Vol 15; 121-124.
- Papadopoulos, G. A. (2002): "Tsunamis in the East Mediterranean: A Catalogue for the Area of Greece and Adjacent Seas". In Proceedings of Joint IOC-IUGG International Workshop on Tsunami Risk Assessment beyond 2000: Theory, Practice and Plans. Moscow, Russia, pp. 34-42.
- Paris, R., Wassmer, P., Sartohadi, J., Lavigne, F., Barhomeuf, B., Desgages, E., Grancher, D., Baumert, P., Vautier, F., Brunstein, D. y Gómez, C. (2009): Tsunamis as geomorphic crises: lessons from the December 26, 2004 tsunami in Lhok Nga, West Banda Aceh (Sumatra, Indonesia). *Geomorphology*, 104: 59-72. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.05.040>
- Pignatelli, C., Ferilli, S., Capolongo, D., Marsico, A., Milella, M., Pennetta, L., Piscitelli, A. y Mastronuzzi, G. (2010): Morphological evidences and computer science techniques in order to evaluate tsunami inundation limit. *Rivista Italiana di Telerilevamento* 42: 129-142. <https://doi.org/10.5721/ITJRS201042210>

- Pignatelli, C., Sanso, P. y Mastronuzzi, G. (2009): Evaluation of tsunami flooding using geomorphologic evidence. *Marine Geology*, 260: 6-18. <https://doi.org/10.1016/j.mar-geo.2009.01.002>
- Rangheard, Y. (1984): The geological history of Eivissa and Formentera, In: H. Kuhbier *et al.* (Eds). *Biogeography and Ecology of the Pityusic Islands*. Dr. W. Junk, The Hague: 25-104. https://doi.org/10.1007/978-94-009-6539-3_3
- Robinson, E., Khan, S., Rowe, D. A. y Coton, R. (2008): Size of boulders moved and emplaced by recent hurricanes, Jamaica. In: Mastronuzzi, G., Pignatelli, P., Sansó, P., Milella, M. y Selleri, G. (Eds.). *Abstract volume of the 2nd International Tsunami Field Symposium, Ostuni (Italy) and Ionian Islands (Greece)*, 22-28 September 2008. GIS Coast Research Publication 6: 135-138.
- Roger, J. y 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. <https://doi.org/10.5194/nhess-8-721-2008>
- Roig-Munar, F.X., Rodríguez-Perea, A., Martín-Prieto, J.A., Vilaplana, J.M., Gelabert, B., Pons, G.X. y Mir-Gual, M. (2014): Morfometría de bloques de tsunami en las costas rocosas del sur de Mallorca (I. Baleares). En: Una aproximación multidisciplinar al estudio de las fallas activas, los terremotos y el riesgo sísmico, (Álvarez-Gómez, J. A. y Martín-González, F., Eds.). *II Reunión Ibérica sobre fallas activas y paleosismología*, Lorca (Murcia, España), 109-102. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4174.0245>
- Roig-Munar, F.X., Rodríguez-Perea, A., Martín-Prieto, J. A., Vilaplana, J. M. y Gelabert, B. (2015): Morfometría de bloques de tsunami en las costas rocosas del Este de Mallorca (Islas Baleares). *Revista Geo-Temas* 15: 229-232. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4452.5520>
- Roig-Munar, F.X. (2016): Blocs de tempesta i tsunami a les costes rocoses de les Illes Balears. Anàlisi geomorfològica i morfomètrica. Tesis doctoral inédita. Departament de Geodinàmica i Geofísica. Universitat de Barcelona. 410 pp.
- Roig-Munar, F.X., Martín-Prieto, J.A., Vilaplana, J. M., Rodríguez-Perea, A. y Gelabert, B. (2016a): Presencia de bloques de tsunamis en acantilados de Punta Prima (Formentera). Ed. Instituto Geológico y Minero de España, Publisher: *Comprendiendo el relieve: del pasado al futuro*, Ed: Durán J. J., Montes Santiago M., Robador A. y Salazar Á, 571-578 p
- Roig-Munar, F.X., Rodríguez-Perea, A., Martín-Prieto, J.A., Vilaplana, J.M. y 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. y Gelabert B. (2016c): Indicadores geomorfológicos de tsunamis históricos en las costas rocosas de Baleares. *Rev. Geo-Temas* 16 (1): 641-644
- Roig-Munar, F.X., Vilaplana, J.M, Rodríguez-Perea, A., Martín-Prieto, J.A. y Gelabert B. (2017): Presencia de bloques de tsunami en los acantilados de Punta Gavina (Formentera, Illes Balears). *Rev. Geo-Temas* 17 (1): 223-226
- Sahal, A., Roger, J. y Allgeyer, S. (2009): The tsunami triggered by the 21 May 2003 Boumerdès-Zemmouri (Algeria) earthquake: field investigations on the French Mediterranean coast and tsunami modeling. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9: 1823-1834. <https://doi.org/10.5194/nhess-9-1823-2009>
- Scheffers, A. M. y Kinis, S. (2014): Stable imbrication and delicate/unstable settings in coastal boulder deposits: Indicators for tsunami dislocation?. *Quaternary International*. 332: 73-84 <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.03.004>
- Scheffers, A. y Kelletat, D. (2003): Sedimentologic and geomorphic tsunami imprints worldwide - a review. *Earth-Science Review*, 63, 83-92. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(03\)00018-7](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(03)00018-7)
- Scheffers, A. y Scheffers, S. (2006): Documentation of Hurricane Ivan on the Coastline of Bonaire. *Journal of Coastal Research*, 22: 1437-1450. <https://doi.org/10.2112/05-0535.1>
- Scheffers, A. y Scheffers, S. R. (2007): Tsunami deposits on the coastline of West Crete (Greece). *Earth and Planetary Science Letters*, 259, (3-4): 613-624. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.05.041>
- Servera, J. (1997): *Els sistemes dunars litorals de les Illes Balears*. Tesis doctoral inédita. Universitat de les Illes Balears, Palma de Mallorca. 2 vol. 908 pp. i atlas 138 pp.
- Shah-Hosseini, M., Morhange, C., de Marco, A., Wante, J., Anthony, E. J., Sabatier, F., Mastronuzzi, G., Pignatelli, C. y Piscitelli, A. (2013): Coastal boulders in Martigues, French Mediterranean: evidence for extreme storm waves during the Little Ice Age. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 57, Suppl. 4: 181-199. <https://doi.org/10.1127/0372-8854/2013/S-00132>

- Silva, P. y Rodríguez Pascua, J. (2014): Catálogo de los efectos geológicos de los terremotos en España. Instituto geológico Minero de España, 358 pp.
- Sotillo, M., Ratsimandresy, A., Carretero, J., Bentamy, A., Valero, F. y González-Rouco, F. (2005): A high-resolution 44-year atmospheric hindcast for the mediterranean basin: contribution to the regional improvement of global reanalysis. *Climate Dynamics*, 25: 219-236. <https://doi.org/10.1007/s00382-005-0030-7>
- Suañez, S., Fichaut, B. y Magne, R. (2009): Cliff-top storm deposits on Banneg Island, Brittany, France: Effects of giant waves in the Eastern Atlantic Ocean. *Sedimentary Geology*, 220: 12-28. <https://doi.org/10.1016/j.sed-geo.2009.06.004>
- Switzer, A. D. y Burston, J. M. (2010): Competing mechanisms for boulder deposition on the southeast Australian coast. *Geomorphology*, 114: 42-54. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.02.009>
- Trenhaile, A. S. (2005): Modelling the effect of waves, weathering and beach development on shore platform development. *Earth Surface Processes and Landforms*, 30: 613-634. <https://doi.org/10.1002/esp.1166>
- Vela, J., Pérez, B., González, M., Otero, L., Olabarrieta, M., Canals, M. y Casamor, J. L. (2010): Tsunami resonance in the Palma de Majorca bay and harbour induced by the 2003 Boumerdes-Zemmouri algerian earthquake (Western Mediterranean). In: Proceedings of 32nd International Conference on Coastal Engineering (ICCE 2010) pp. 1-12. <https://doi.org/10.9753/icce.v32.currents.7>
- Wang, X. y Liu, P. L. F. (2005): A numerical investigation of Boumerdes-Zemmouri (Algeria) earthquake and tsunami. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 10, 171-183.
- Weiss, R. (2012): The mystery of boulders moved by tsunamis and storms. *Marine Geology* 295-298: 28-33. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2011.12.001>
- Zhao, X., Chen, Y, Huang, Z., Hu, Z., and Gao, Y, (2017): A numerical study of tsunami wave impact and run-up on coastal cliffs using a CIP-based model. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 17, 641-655. <https://doi.org/10.5194/nhess-17-641-2017>