

Presencia de bloques de tsunamis en las costas rocosas de Menorca: análisis morfométrico

Francesc X. Roig-Munar¹, Antonio Rodríguez-Perea², José Á. Martín-Prieto^{1,2},
Joan Manuel Vilaplana Fernández³ y Bernadí Gelabert Ferrer⁴

¹ Q4atre Consultoria
Ambiental, Es Migjorn Gran.

² Departament de Geografia,
Universitat de les Illes
Balears, Palma.

³ Departament de Dinàmica
de la Terra i de l'Oceà. Grup
RISKMAT, Universitat de
Barcelona, Barcelona.

⁴ Departament de Biologia,
Universitat de les Illes
Balears, Palma.

RESUMEN

Se presenta el estudio morfométrico de los bloques depositados en tres sectores de la isla de Menorca, E, SE y N. Las terrazas litorales asociadas a acantilados de Menorca presentan acumulaciones de bloques de tamaño métrico que han sido transportados tierra adentro por tsunamis. Estos bloques, depositados individualmente o formando cordones paralelos a la costa, se encuentran a alturas que van desde 0 hasta 30 m sobre el nivel del mar y hasta 75 m tierra adentro. La mayoría de los bloques son rectangulares, de cantos angulosos y su peso oscila entre 0,25 y 27 T. Se han aplicado ecuaciones de transporte para discernir entre acumulaciones derivadas de eventos de tormenta o eventos de tsunami. Los resultados indican que todas las áreas analizadas presentan bloques de tsunamis y que sus orientaciones son coincidentes con las modelizaciones realizadas de trayectorias de ola de tsunami procedentes del N de Argelia

Palabras clave: bloques de tsunami, morfometría, acantilados, Menorca.

ABSTRACT

This paper analyses the morphometric study of blocks deposited in three sectors of the island of Menorca, E, SE and N. The coastal terraces associated to Menorca cliffs show accumulations of metric-sized blocks that have been transported inland by tsunamis. These blocks, deposited individually or forming ridges parallel to the coast, are at heights ranging from 0 to 30 m above sea level and up to 75 m inland. Most of the blocks are rectangular, showing edges, which weight ranges from 0.25 to 27 T. Transport equations have been applied to discern between accumulations derived from storm or tsunami events. The results indicate that all the analysed areas present blocks of tsunamis which orientations are coincident with the model of tsunami wave trajectories coming from the N of Algeria.

Keywords: boulders, tsunamis, morphometry, cliffs, Menorca.

1 | Introducción

La existencia de bloques desplazados por tsunamis ha sido ampliamente documentada en el Mediterráneo (Maouche *et al.*, 2009; Goto *et al.*, 2009; Furlani *et al.*, 2014; Biolchi *et al.*, 2015; Roig-Munar, 2016). Diversos bloques aislados o bien en forma de cordones situados sobre la cornisa de los acantilados o de las terrazas de las costas rocosas son interpretados como sedimentos de tsunamis acaecidos a lo largo de los últimos siglos (Kelletat *et al.*, 2005; Mastronuzzi *et al.*, 2007; Maouche *et al.*, 2009; Pignatelli *et al.*, 2009; Roig-Munar *et al.*, 2015). La frecuencia y magnitud de los procesos erosivos y sedimentarios que se dan en las costas rocosas permiten la conservación de estos depósitos de grandes bloques (Roig-Munar *et al.*, 2016a y b).

En las islas Baleares se encuentran acumulaciones de bloques en la cornisa de los acantilados o en las terrazas de las costas rocosas, algunos situados por encima de las mayores alturas de ola del registro histórico, y a grandes distancias de la cornisa del acantilado. La ausencia de cantiles tras las terrazas donde se acumulan tales depósitos, junto a las largas distancias a las que se encuentran los primeros accidentes del relieve, permiten descartar que su emplazamiento se deba a caídas gravitacio-

nales. Los bloques situados sobre acantilados bajos y cercanos a la línea de costa son ocasionalmente retrabajados por el oleaje, sin perder sus características morfológicas, de imbricación y orientación propias de eventos de gran energía (Scheffers y Kinis, 2014; Roig-Munar *et al.*, 2016a). De hecho, las modelizaciones de Roger y Hébert (2008) concluyen que se requiere un estudio para determinar la existencia de depósitos de tsunamis en el Mediterráneo occidental, con especial atención en Baleares.

La presencia de bloques en las costas rocosas de Menorca fue estudiada inicialmente por Gómez-Pujol y Roig-Munar (2013) en una localidad de la costa SW de Menorca, con una primera aproximación netamente metodológica. Roig-Munar *et al.* (2014, 2015 y 2016b) ampliaron el alcance del estudio al resto de las costas de Baleares (Roig-Munar, 2016; Roig-Munar *et al.*, 2016b). Se aplicaron diferentes ecuaciones para discernir el mecanismo de deposición de los bloques –tormentas vs. tsunamis– (Scheffers y Kelletat, 2003; Nott, 2003; Pignatelli *et al.*, 2009, Barbano *et al.*, 2010; Engel y May, 2012), y la relación de estos últimos con las trayectorias de tsunamis provenientes del N de África.

2 | Marco geológico y geomórfico

Tanto desde un punto de vista geológico como geomorfológico, Menorca se divide en dos unidades morfoestructurales separadas por una línea imaginaria WNW-ESE que se extiende desde Maó hasta la ensenada de Cala Morell. La mitad meridional, el *Migjorn*, abarca todo el S de Menorca y está formada por materiales del Mioceno superior en forma de un anticlinal muy laxo con el eje orientado de N-S; mientras que la mitad septentrional, la *Tramuntana*, reúne materiales de edad paleozoica, mesozoica y oligocena que, fracturados y plegados por la orogenia alpina, constituyen la mitad septentrional de la isla. De este modo la estructura de *Tramuntana* refleja principalmente la etapa compresiva desarrollada durante el Oligoceno superior y el Mioceno medio, mientras que la estructura de *Migjorn* refleja una etapa extensiva del Mioceno superior seguida de una compresión de menor escala e intensidad durante el Plio-Cuaternario (Gelabert *et al.*, 2005).

Menorca presenta un clima marítimo caracterizado por una altura de ola significativa entre 0,5 y 1,5 m, con períodos de máximos asociados de 5 a 7 s y con una componente dominante del SW, seguida de una ESE. El régimen extremo ofrece probabilidades del 90% para eventos anuales de 5 m de altura de ola significativa, y valores de 7,8 y 8,3 m para periodos de recurrencia, respectivamente, de 20 y 50 años. Los valores extremos de los últimos 50 años presentan alturas de olas significativa de alrededor de 11 m en el sector N de Baleares y en torno a 8,5 m en el SE de Menorca (Cañellas *et al.*, 2007). La ola máxima registrada en la boya de Maó data de noviembre de 2001, con dirección NE, y alcanzó los 13,5 m.

El registro de sismicidad histórica e instrumental del Mediterráneo occidental, pone de manifiesto que el N de Argelia está expuesto a riesgos sísmicos relevantes, siendo el último evento sísmico registrado el acaecido en Zemmouri el 21 de mayo de 2003. Este fue generado por una falla inversa y con una magnitud de 6,9, fue el responsable del tsunami que alcanzó las Baleares con sobrelevaciones máximas por remonte (*runup*) de 3 m. Las simulaciones de este tsunami muestran su impacto directo en Menorca (Hébert y Alasset, 2003; Alasset *et al.*, 2006). Álvarez-Gómez *et al.*

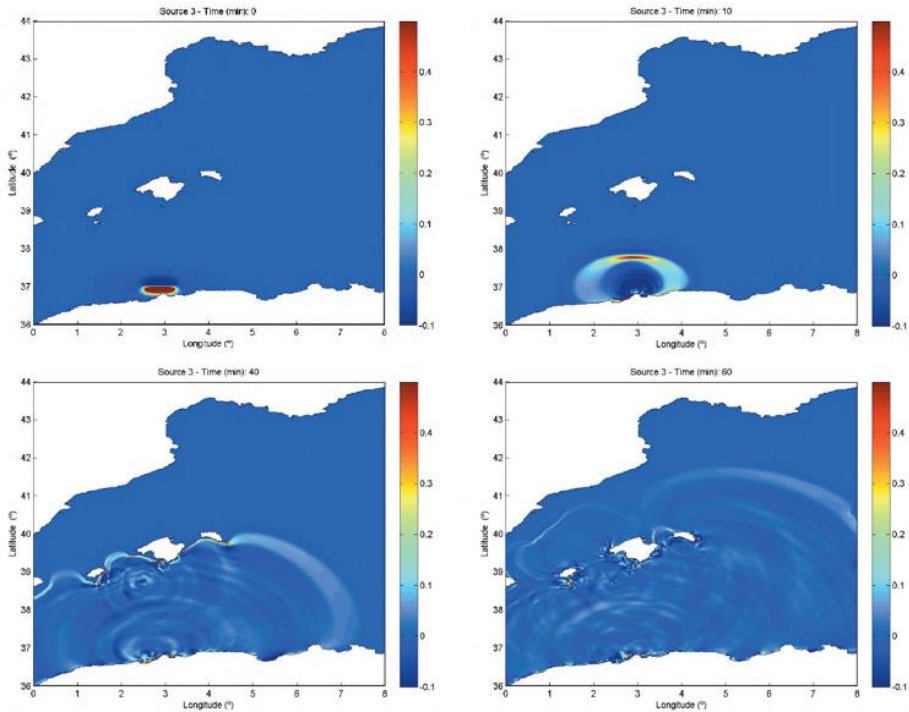


Figura 1. Modelización de las fuentes tsunámicas del N de Argelia y el efecto de escudo de las islas Baleares frente la península Ibérica. Fuente: Álvarez-Gómez *et al.* (2010).

Figure. 1. *Tsunami waves propagation from the N of Algeria and the role of Balearic Islands as a mainland protection.* Source: Álvarez-Gómez *et al.* (2010).

(2010) realizaron una modelización de la propagación del tsunami (Fig. 1), en la que concluían que debido a los cambios de batimetría y a la existencia de una pronunciada pendiente en la plataforma continental de las Baleares, la ola del tsunami sufrió una importante refracción con trayectorias perpendiculares a la plataforma continental.

3 | Método

En una primera fase exploratoria se localizaron, identificaron y caracterizaron las áreas con presencia de acumulaciones de bloques en crestas de acantilados o costas rocosas bajas a lo largo del litoral de Menorca. Una vez catalogados los depósitos, se procedió al análisis morfométrico de los bloques, calculando los valores del eje máximo (A), eje mínimo (B) y eje intermedio (C) de cada bloque para determinar su volumen y se estimaron las densidades de la roca para calcular su masa. Para determinar un volumen más preciso se aplicó la triangulación de volúmenes de Robinson *et al.* (2008). En paralelo, de cada uno de los bloques se han obtenido los ángulos de orientación y buzamiento, así como su cota sobre el nivel del mar y la distancia a la línea de costa. Una vez caracterizada la forma y dimensiones de los bloques, se ha calculado el valor del Transporte Figure (TF), de Scheffers y Kelletat

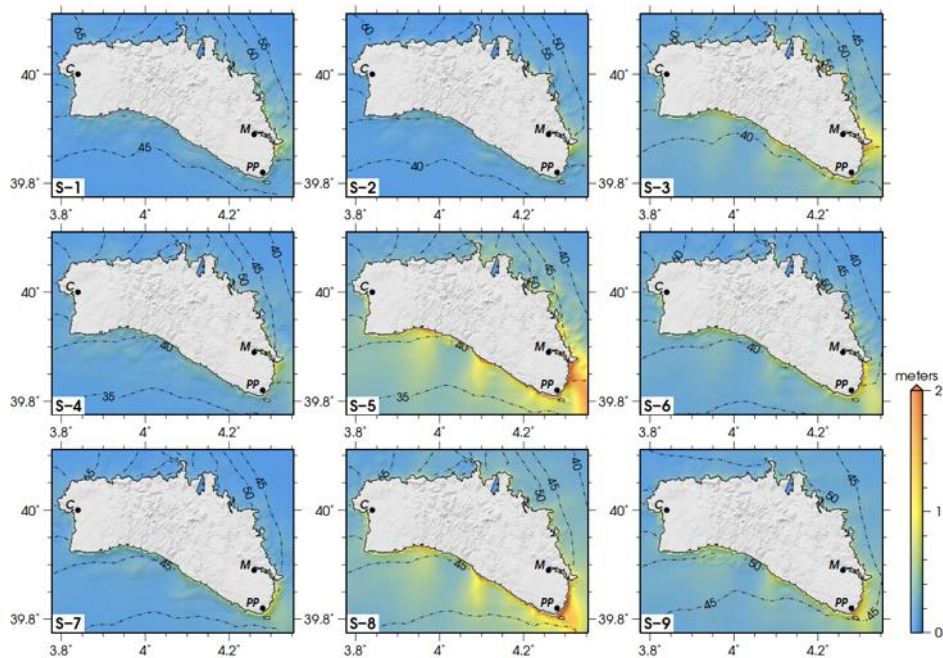


Figure 2. Mapas de elevación de ola máxima y tiempos estimados de viaje del tsunami para la isla de Menorca. El sombreado representa la elevación de las olas valor. Los contornos muestran el tiempo de viaje del tsunami con intervalos de 5 minutos (Álvarez *et al.*, 2011).

Figure 2. Maximum wave height and tsunami wave front travel time for Menorca (dashed lines). Source: Álvarez *et al.* (2011).

(2003), consistente en el producto de tres parámetros: el peso del bloque, la distancia respecto al mar a la que se encuentra y la altura sobre el nivel del mar. En paralelo, también se han aplicado las ecuaciones de Nott (2003), Pignatelli *et al.* (2009), Barbano *et al.* (2010) y Engel y May (2012) para calcular los valores hidrodinámicos necesarios para el arranque, desplazamiento y deposición de los bloques bajo diferentes escenarios hidrodinámicos y de contexto fisiográfico (i.e. bloque sumergido, bloque subaéreo y bloque delimitado por fracturas). Estas ecuaciones permiten establecer alturas de sobre elevación del rompiente (*run-up*) para olas de tormenta (H_s) y/o tsunamis (H_t) que necesarias para la remoción y/o arranque y posterior deposición de los bloques (Tabla 1).

4 | Áreas de estudio

Se han analizado campos de bloques en 24 localidades, distribuidas en 3 sectores o fachadas marítimas en los que se identifican bloques asociados tanto a flujos de tsunami como a flujos de tormenta (Roig-Munar, 2016) (Fig. 3).

En el Sector Sudeste se han estudiado un conjunto de siete localidades. Es un sector que se caracteriza por presenta una costa escarpada con acantilados de hasta 15 m de altura que disminuyen de forma progresiva hacia el extremo oriental hasta la

	Criterio	Ht	Hs
Nott (2003)	sumergido	$H_t = [0,25(\rho_s - \rho_w / \rho_w) 2a] / [(C_d (ac/b^2) + C_i)]$	$H_s = [(\rho_s - \rho_w / \rho_w) 2a] / [(C_d (ac/b^2) + C_i)]$
	subaéreo	$H_t = [0,25 (\rho_s - \rho_w / \rho_w) [2a - C_m (a/b) (\dot{u}/g)] / [C_d (ac/b^2) + C_i]$	$H_s = [(\rho_s - \rho_w / \rho_w) [2a - 4C_m (a/b) (\dot{u}/g)]] / [C_d (ac/b^2) + C_i]$
	limitado por juntas	$H_t = [0,25 (\rho_s - \rho_w / \rho_w) a] / C_i$	$H_s = [(\rho_s - \rho_w / \rho_w) a] / C_i$
Pignatelli (2009)	limitado por juntas	$H_t = [0,5 \cdot c \cdot (\rho_s - \rho_w / \rho_w)] / C_i$	
Engel and May (2012)	subaéreo	$H_t = 0,5 \cdot \mu \cdot V \cdot \rho_b / C_D \cdot (a \cdot c \cdot q) \cdot \rho_w$	$H_s = 2 \cdot \mu \cdot V \cdot \rho_b / C_D \cdot (a \cdot c \cdot q) \cdot \rho_w$
	limitado por juntas	$H_t = (\rho_b - \rho_w) \cdot V \cdot (\cos \theta + \mu \cdot \sin \theta) / 2 \cdot \rho_w \cdot C_L \cdot a \cdot b \cdot q$	$H_s = (\rho_b - \rho_w) \cdot V \cdot (\cos \theta + \mu \cdot \sin \theta) / 0,5 \cdot \rho_w \cdot C_L \cdot a \cdot b \cdot q$

Tabla 1. Ecuaciones aplicadas a cada bloque para la estimación de los forzamientos por tormenta o tsunami. H_t altura de la ola de tsunami, H_s altura de la ola de temporal, ρ_s densidad del bloque, ρ_w densidad del agua de mar, V volumen del bloque, μ coeficiente de fricción, a eje mayor del bloque, b eje medio del bloque, c eje menor del bloque, g fuerza de la gravedad, q coeficiente de volumen, C_d coeficiente de arrastre, C_i coeficiente de levantamiento, C_m coeficiente masa, \dot{u} velocidad del flujo, θ pendiente del acantilado.

Table 1. Equations for determining the tsunami or the sea storm boulder triggering mechanism. H_t tsunami wave height, H_s sea storm wave height, ρ_s Boulder density, ρ_w sea water density, V boulder volume, μ friction coefficient, a Boulder major axis, b boulder medium axis, c boulder minimum axis, g gravity, q volume coefficient, C_d transport coefficient, C_i elevation coefficient, C_m mass coefficient, \dot{u} flow velocity, θ cliff slope.

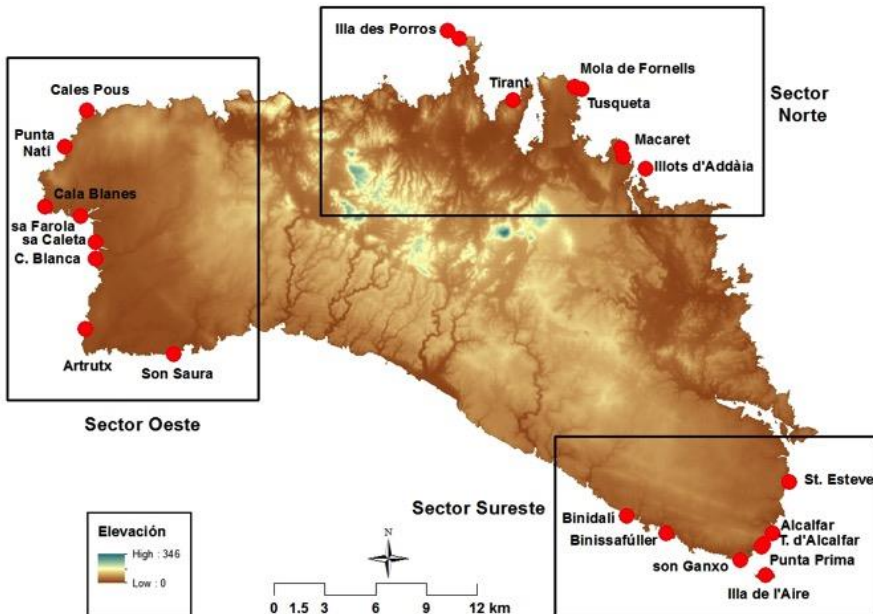


Figura 3. Zonas de estudio citadas en el texto.

Figure 3. Study site location cited in the text.

cota cero en cala Sant Esteve y Punta Prima. Este litoral se encuentra sometido a un clima marítimo caracterizado en los últimos 50 años por una altura máxima de ola significativa de 8,5 m y dirección SE y de olas de 10 m del NNE al sector SE-NE (Cañellas *et al.*, 2007). El Sector Oeste, donde se han caracterizado ocho localidades, discurre por una costa escarpada y articulada, muy condicionada por la fracturación y por la presencia de calas asociadas a barrancos (Segura y Pardo, 2003). Este litoral se encuentra sometido a un clima marítimo caracterizado en los últimos 50 años por una altura máxima de olas significativas de 8 m con un componente dominante del SW en la costa S y de 10 m con un componente NNE en tramo N (Cañellas *et al.*, 2007). En el Sector Norte, se han analizado ocho localidades. En términos generales se trata de una costa escarpada y articulada muy condicionada por la fracturación, recortada sobre roquedos del Triásico y el Jurásico. El litoral se caracteriza por una imponente fachada de acantilados superiores a los 10 m. Este litoral se encuentra sometido a un oleaje que en los últimos 50 años ha registrado algunos eventos con alturas máximas de ola significativa de 10 m de componente dominante del NNE (Cañellas *et al.*, 2007).

5 | Resultados

Para el conjunto de las localidades descritas se han caracterizado un total de 3.144 bloques. Para simplificar el análisis y siguiendo los criterios de Roig-Munar *et al.* (2015), en los resultados del presente estudio sólo se presentan los bloques con Transport Figure, TF de Scheffers y Kelletat (2003), superiores a 1.000. Valor representativo de su masa, de su altura sobre el nivel del mar y de su distancia a la costa.

Sector Sudeste

Se han analizado 1.762 bloques situados en 8 áreas, de los cuales el 15,55 % presentan un TF superior a 1.000 y el 29,9%, de estos, se encuentran sobre acantilados más altos que las máximas alturas de ola registradas. Los bloques TF>1000, tienen unas dimensiones de sus ejes de 3,01 x 2,2 x 0,9 m, con un peso medio de 11,62 T. Están situados a una altura media de 6,2 m snm y a una distancia media de 61 metros de la cornisa del acantilado (Fig. 4).



Figura 4. Depósito de bloques en acantilados de Alcafzar (izquierda) y Binissafüller (derecha).
Figure 4. Cliff-top boulder deposits at Alcafzar (left) and Binissafüller (right).

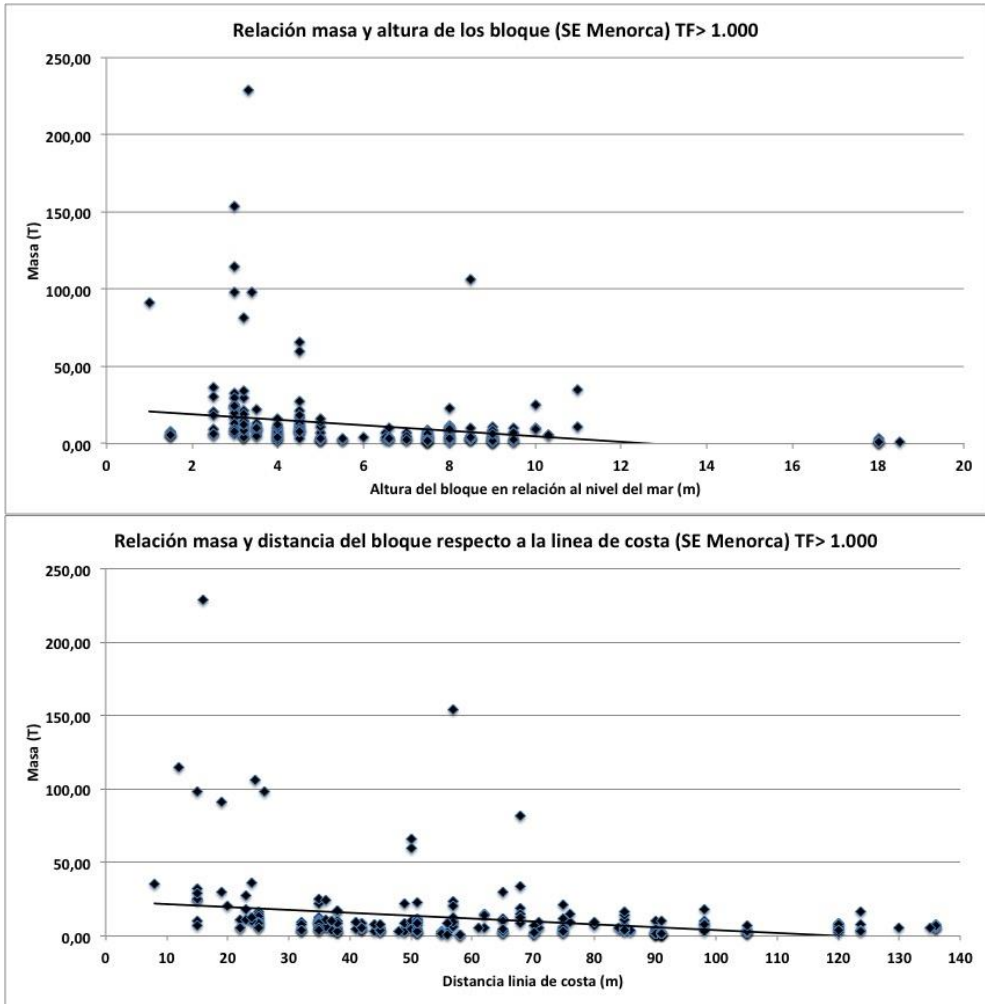


Figura 5. Distribución de bloques del sector SE, con TF>1.000 ubicados sobre acantilados superiores a la altura de las olas máximas registradas y en función de su altura sobre el nivel del mar y su peso (a) y en función de su distancia de la costa y su peso(b).

Figure 5. Boulder mass and height above mean sea level (a) and boulder mass and distance from shoreline (b) of boulders larger than TF =1.000 at the SE sector.

En cuanto a la distribución de los bloques en función de su altura snm o la distancia a la línea de costa, en la Fig. 5 se observa la existencia de un mayor número de bloques entre los 2,5 y 5,5 m de altura, mientras que el resto de bloques presentan una distribución heterogénea a partir de los 6 m hasta los 18 m de altura. Dicho grupo aparece en rampas y acantilados bajos, con un peso medio de 12,5 T y una disposición en cordones imbricados; mientras que los bloques dispersos entre las alturas de 6 y 18 m aparecen sobre los acantilados de mayor envergadura. En la Fig. 5b puede apreciarse como no existe ninguna distribución preferente entre los 22 y los 90 m de

Conicionados por juntas		Subaéreos	
Rt	Rs	Rt	Rs
13,3	19,2	10,48	11,94

Tabla 2. Valores medios de la sobreelevación por remonte (run-up) necesaria bajo diferentes supuestos del inicio del desplazamiento de los bloques del sector SE (condicionados por juntas y subaéreos) de acuerdo con las ecuaciones de Engel y May (2012).

Table 2. Mean values of boulder displacement forced by different mechanisms at SE sector (delimited by joints or subaerial) according to Engel and May (2012) equations.

distancia respecto de la línea de costa. Las distancias medias de los bloques en relación con la cornisa es de 37 m y su peso medio de 10,1 T. Las orientaciones dominantes de los bloques son de 146° , coincidiendo con las trayectorias de avance del frente de la ola de tsunami descritas por Roger y Hébert (2008) y Álvarez-Gómez *et al.* (2010 y 2011). Los bloques ubicados sobre la altura del máximo oleaje registrado presentan dimensiones algo menores en sus tres ejes (2,21 x 1,5 x 0,8 m) y un peso medio de 4,29 T. Están situados a una altura media de 9,2 m snm y a una distancia media de 62 metros de la cornisa del acantilado.

Al aplicar las ecuaciones hidrodinámicas de Engel y May (2012) obtenemos las columnas de agua necesarias para el desplazamiento de los bloques (Fig. 6). Para los bloques delimitados por juntas, la altura media del *run-up* del oleaje requerida es de 19,3 m, mientras que para las columnas de agua de sobreelevación por tsunamis es de 12,1 m. En el caso de bloques subaéreos la altura media del *run-up* del oleaje debería

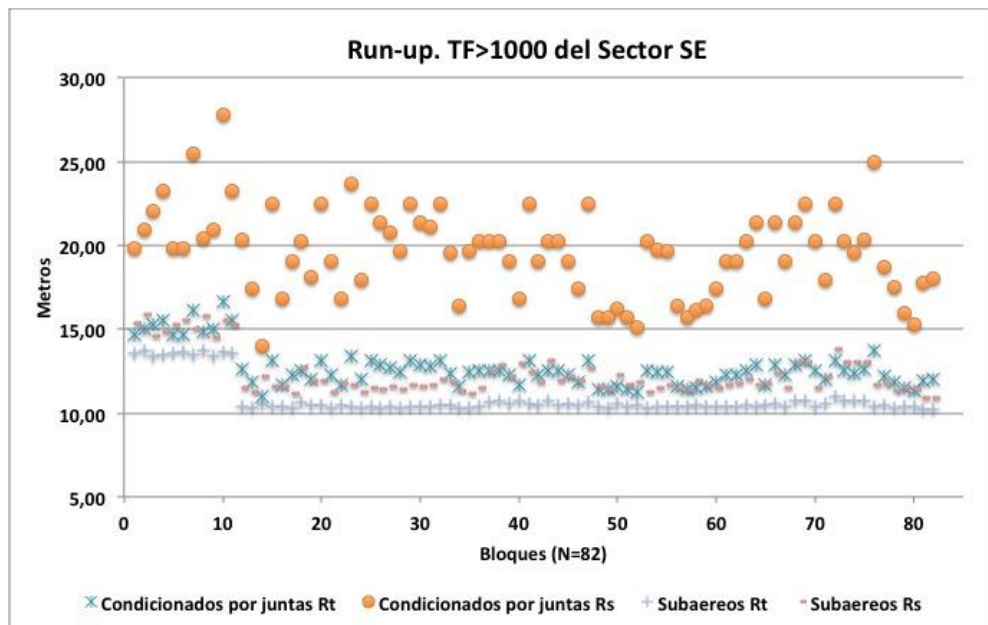


Figura 6. Sobreelevación por remonte (run-up) para los bloques del sector SE bajo distintos supuestos de oleaje de tormenta (Rs) o ola de tsunami (Rt).

Figure 6. Boulder emplacement by run-up for the SE study site under different triggering scenarios, wave storms (Rs) and tsunami (Rt).

llegar a 11,59 m, mientras que un *run-up* de tsunami necesitaría alcanzar 10,5 m (Tabla 2). Por tanto, las columnas de *run-up* nos indican que el arranque de estos bloques por oleaje de temporal (R_s) requiere alturas muy elevadas que no encuentran parangón en ninguna tormenta registrada o conocida en el Mediterráneo occidental y que sólo en las posiciones menos elevadas pueden registrarse retrabajamiento por tormentas. En efecto, los bloques en acantilados con alturas de 10 y 11 m snm registran flujos de tsunamis, tanto por la altura y la distancia a la que se emplazan como por las columnas de agua necesarias para su removilización. Además, dichos flujos necesariamente actuaron sobre el resto de bloques, tal y como apuntarían los cordones de bloques imbricados presentes en las costas más bajas.

Sector Oeste

En el sector occidental se han analizado 1.043 bloques repartidos en 8 áreas, donde el 32,2% de los bloques superan el $TF > 1000$, y el 13,6% se encuentran sobre acantilados más altos que las máximas olas registradas. Los bloques superiores a $TF > 1000$ presentan un valor medio de TF de 2.404 y las dimensiones medias de sus ejes son de 2,3 x 1,9 x 0,7 m, con un peso promedio de 4,56 T. Suelen emplazarse a 16 m de altura snm y a distancias de 40 m respecto de la cornisa del acantilado (Fig. 7). En el conjunto de los bloques de esta zona, llama la atención la existencia nítida de dos poblaciones de bloques en función de la altura de su emplazamiento. En la Fig. 8 se aprecian dos agrupaciones de bloques: una primera agrupación en torno a los 10 m de altura y con un peso medio de 5 T, que corresponde a las áreas ubicadas en el S y W del sector y a los acantilados menos elevados. Y una segunda, que se corresponde con las tres áreas ubicadas en el N del sector, y presenta una altura media de 24 m snm y un peso de 4,8 T. En el caso de la primera agrupación las alturas máximas del oleaje registrado pueden modificar los bloques, mientras que en la segunda agrupación no es posible. En cuanto a la distancia de los bloques al borde del acantilado (Fig. 8b) también presentan dos agrupaciones, una primera en torno a los 38 y 45 m de la cornisa y con pesos medios de 4,8 T, y un segundo grupo entre los 60 y 65 m y con pesos medios de 3,3 T.



Figura 7. Depósito de bloques en Punta Nati (izquierda) y Son Saura del Sur (derecha).
Figure 7. Cliff-top boulder deposits at Punta Natu (left) and south of Son Saura (right).

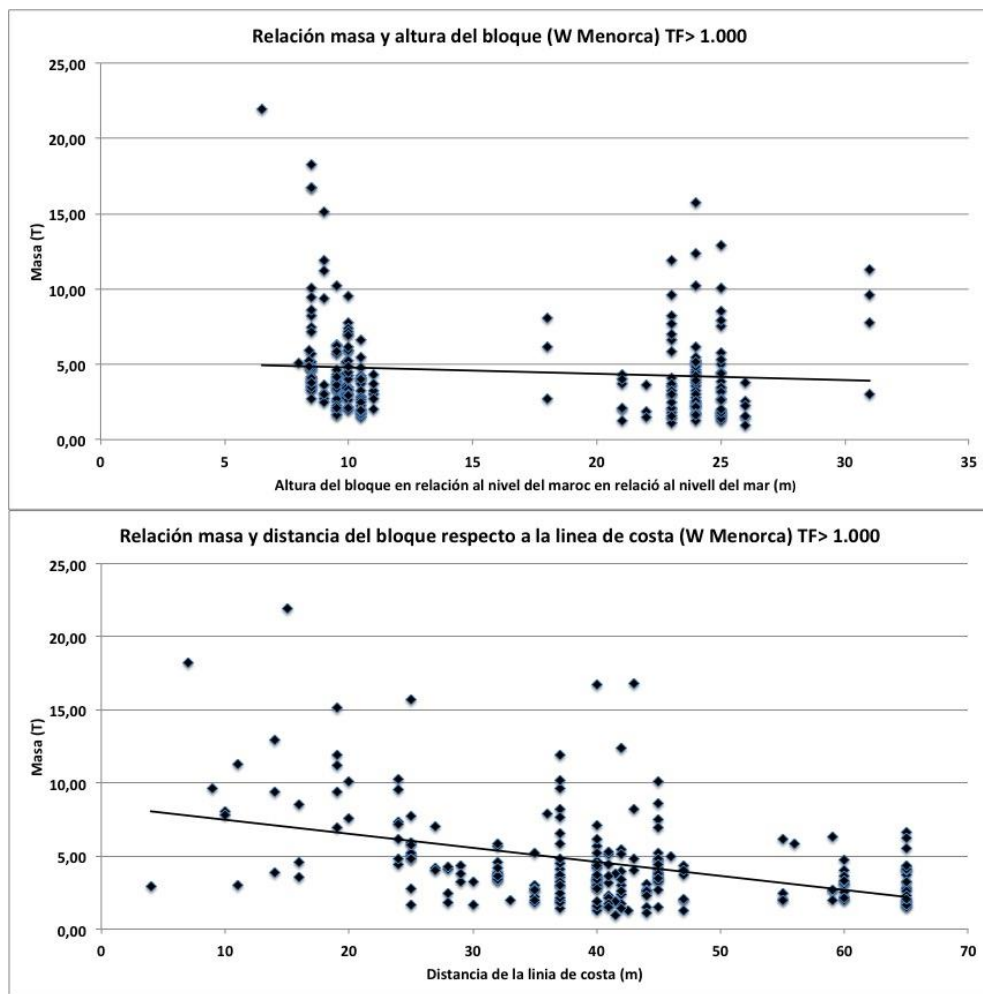


Figura 8. Distribución de bloques del sector W, con TF>1.000 ubicados sobre acantilados superiores a la altura de las olas máximas registradas y en función de su altura sobre el nivel del mar y su peso (a) y en función de su distancia de la costa y su peso(b).

Figure 8. Boulder mass and height above mean sea level (a) and boulder mass and distance from shoreline (b) of boulders larger than TF=1.000 at the Western sector.

Condicionados por juntas		Subaéreos	
Rt	Rs	Rt	Rs
20,81	29,74	18,35	19,91

Tabla 3. Valores medios de la sobreelevación por remonte (run-up) necesaria bajo diferentes supuestos del inicio del desplazamiento de los bloques del sector W (condicionados por juntas y subaéreos) de acuerdo con las ecuaciones de Engel y May (2012).

Table 3. Mean values of boulder displacement forced by different mechanisms at W sector (delimited by joints or subaerial) according to Engel and May (2012) equations.

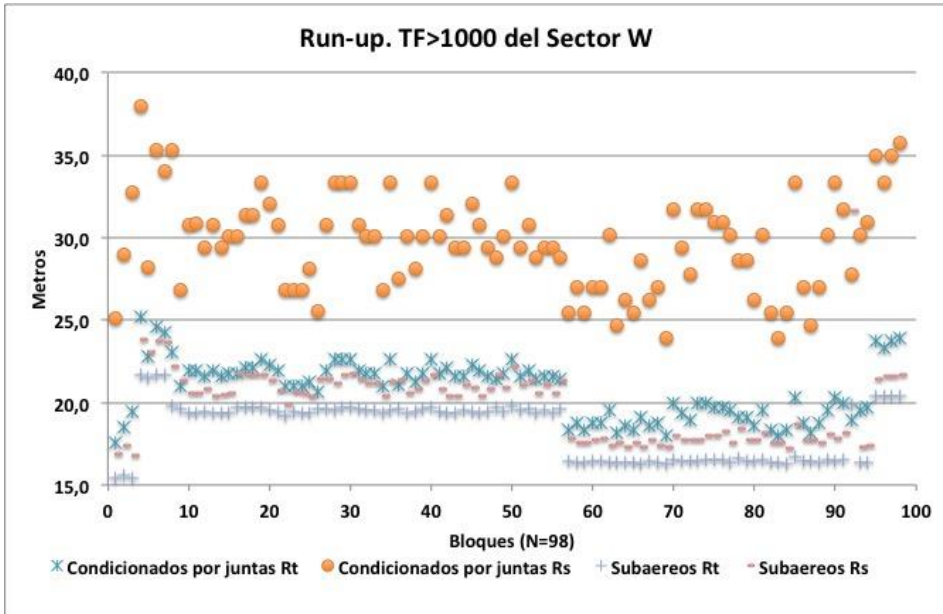


Figura 9. Sobre elevación por remonte (run-up) para los bloques del sector W bajo distintos supuestos de oleaje de tormenta (Rs) o ola de tsunami (Rt).

Figure 9. Boulder emplacement by run-up for the W study site under different triggering scenarios, wave storms (Rs) and tsunami (Rt).

En cuanto a las orientaciones dominantes de los bloques diferenciamos aquellos bloques situados en el S y W del sector: presentan orientaciones al 203° , congruentes con los escenarios S-3, S-5 y S-8, e incluso escenarios de refracción entre el canal de Mallorca y Menorca. En cambio los bloques ubicados sobre los mayores acantilados del N, presentan unas orientaciones medias de 71° , que no se corresponden con las trayectorias definidas por Álvarez-Gómez *et al.* (2010, 2011).

La presencia de estos bloques podría registrar tsunamis provenientes del NW, del N o del NE, producidos por sismos o grandes deslizamientos submarinos (Lastras *et*



Figura 10. Depósito de bloques en Tusqueta (izquierda) y la Illa des Porros (derecha).

Figure 10. Cliff-top boulder deposits at Tusqueta (left) and Illa dels Porros (right).

al., 2004 a y b; Canals *et al.*, 2004). Los bloques en acantilados superiores a la altura máxima del oleaje registrado, presentan un TF medio de 3.316 y las dimensiones medias A, B y C de $2,05 \times 1,6 \times 0,8$ m, un peso medio de 4,25 T, situados a una altura media de 24 m snm y a una distancia media de 36 metros de la cornisa. Se descartan las influencias del oleaje sobre estas cornisas con alturas entre 18 y 25 m snm (Fig. 9). Los valores estimados de la columna de agua para el arranque de los bloques del sector W en caso de tormentas (H_s) y tsunamis (H_t) son 29,74 m y de 21,69 y 20,81 m respectivamente, en el caso de bloques subaéreos, su desplazamiento requiere en caso de tormentas 19,9 m y para tsunamis 18,3 m (Tabla 3). Queda, por tanto, manifiesto que las sobreelevaciones por remonte necesarias para arrancar o desplazar cada bloque de este sector, son valores muy elevados que no corresponden a ninguna tormenta registrada o conocida en el Mediterráneo occidental.

Sector Norte

En los acantilados septentrionales se ha caracterizado la morfometría de 339 bloques, repartidos en 8 áreas, de los que el 63,1% superan el TF1000 y el 8,4% de éstos se encuentran sobre acantilados más altos que las olas máximas registradas. Los bloques superiores a TF>1000 presentan un TF medio de 8.501, sus dimensiones medias son de $2,53 \times 1,9 \times 1,3$ m y su peso medio de 12,07 T (Fig. 10). Suelen emplazarse a una altura media de 12 m snm y a una distancia media de 66 metros de la cornisa del acantilado. Las orientaciones dominantes de los bloques con TF> 1.000 es 136° , indicando tanto una eventual coincidencia con oleajes del SE que disponen de un *fetch* mayor, como con refracciones de las trayectorias tsunamíticas definidas por Roger y Hébert (2008) y Álvarez-Gómez *et al.* (2010, 2011).

La distribución de las alturas de los bloques en este sector (Figura 11 a) presenta dos agrupaciones: una primera entre los 3 y los 15 m de altura con un peso medio de 14,1 T y otra, entre los 18 y 27 m de altura, correspondiente a la Mola de Fornells, con acantilados verticales elevados en donde los bloques presentan un peso medio de 3,45 T. En algunas ocasiones los bloques se ven favorecidos por morfologías *flowout* que permiten su llegada a mayores distancias y alturas. Este punto puede apreciarse en la Fig. 11b, donde la mayor concentración de bloques se encuentra entre los 65 y 70 metros de distancia, con una media de 66,1 m y un peso medio de 12 T.

En la Mola de Fornells (Fig. 1) se disponen bloques por encima la altura máxima de las olas de temporal registradas, siendo los acantilados de más de 20 m de altura. El TF medio de los bloques de este área es de 5.655, sus dimensiones medias de $1,71 \times 1,3 \times 0,9$ m y presentan un peso medio de 3,45 T. Suelen encontrarse situados a una altura media de 23 m snm y a una distancia media de 69 metros de la cornisa del acantilado.

Los valores estimados de sobreelevación por remonte (*run-up*) de la columna de agua para el arranque y el desplazamiento de estos bloques son, en el caso de las tormentas, 33,86 m, y de 23,4 m para tsunamis (Tabla 4). Si interpretamos el escenario inicial de arranque de los bloques como subaéreo, los valores de *run-up* para su desplazamiento en caso de tormentas serán de 21,86 m (Tabla 4) y 20,4 m en tsunamis. Las columnas de agua requeridas para arrancar o movilizar cada bloque de TF>1000 son muy elevadas (Fig. 12), y no encuentran parangón con ninguna tormenta registrada y conocida en el Mediterráneo occidental Si interpretamos el escenario inicial de arranque de los bloques como subaéreo, los valores de *run-up* para su desplazamiento en caso de tormentas serán de 21,86 m. (Tabla 4) y 20,4 m en tsuna-

Conicionados por juntas		Subaéreos	
Rt	Rs	Rt	Rs
23,44	33,76	20,47	21,86

Tabla 4. Valores medios de la sobreelevación por remonte (*run-up*) necesaria bajo diferentes supuestos del inicio del desplazamiento de los bloques del sector N (condicionados por juntas y subaéreos) de acuerdo con las ecuaciones de Engel y May (2012).

Table 4. Mean values of boulder displacement forced by different mechanisms at the N sector (delimited by joints or subaerial) according to Engel and May (2012) equations.

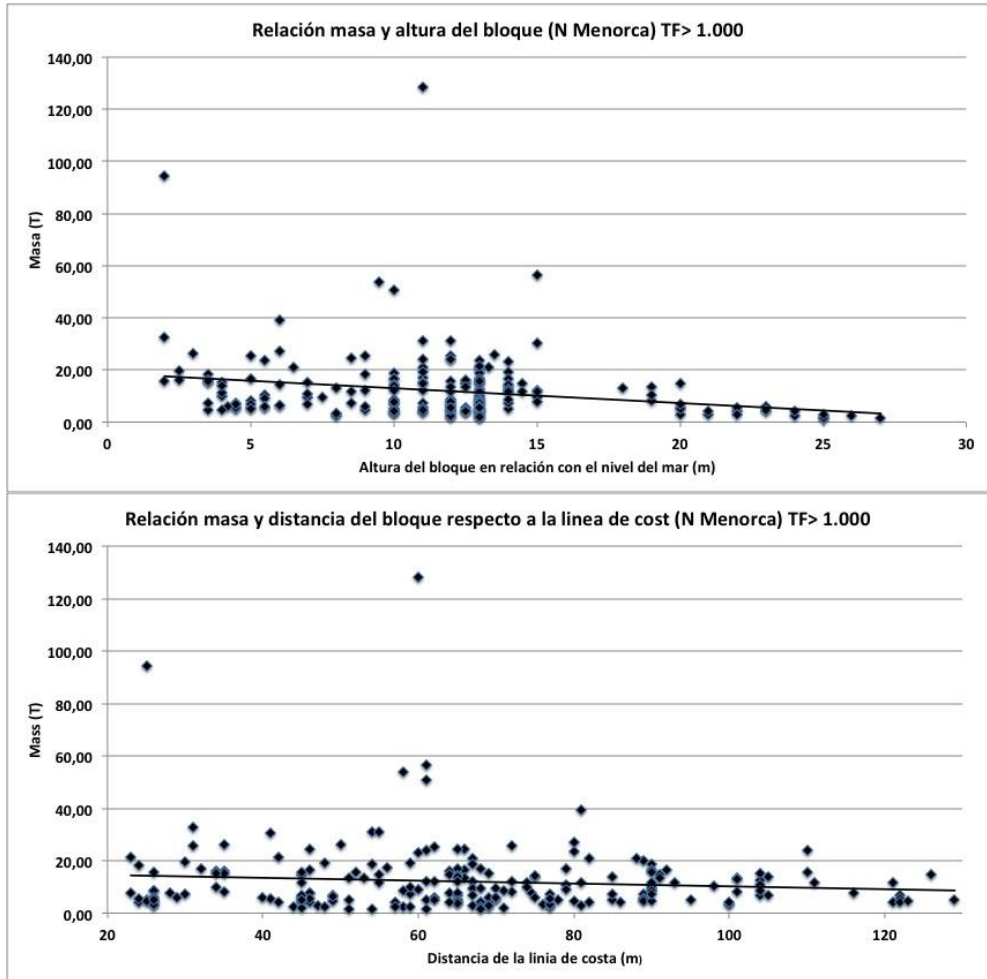


Figura 11. Distribución de bloques del sector N con TF>1.000 ubicados sobre acantilados superiores a la altura de las olas máximas registradas y en función de su altura sobre el nivel del mar y su peso (a) y en función de su distancia de la costa y su peso(b).

Figure 11. Boulder mass and height above mean sea level (a) and boulder mass and distance from shoreline (b) of boulders larger than TF=1.000 at the Northern sector.

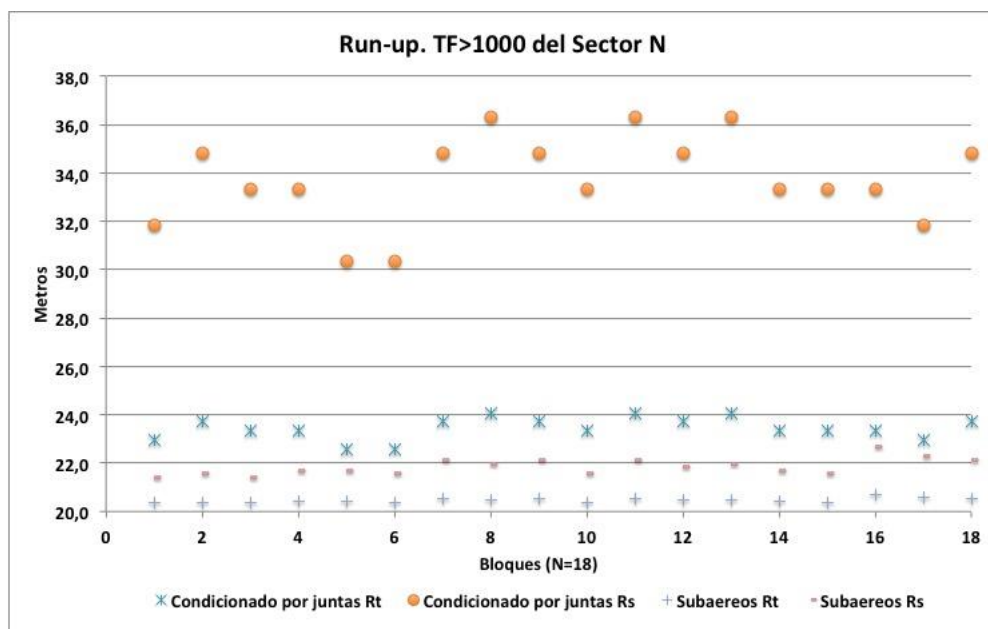


Figura 12. Sobre elevación por remonte (run-up) para los bloques del sector N bajo distintos supuestos de oleaje de tormenta (Rs) o ola de tsunami (Rt).

Figure 12. Boulder emplacement by run-up for the N study site under different triggering scenarios, wave storms (Rs) and tsunami (Rt).

mis. Las columnas de agua requeridas para arrancar o movilizar cada bloque de TF>1000 son muy elevadas (Fig. 12), y no encuentran parangón con ninguna tormenta registrada y conocida en el Mediterráneo occidental.

La orientación dominante de estos bloques TF>1000 es de 93° y no coincide con las posibles refracciones de las fuentes tsunámicas norafricanas, ni con las modelizaciones existentes. Su emplazamiento y las columnas de agua que requiere su movilización apuntan a flujos tsunámicos de grandes dimensiones, cuyo origen difícilmente puede ser atribuido a refracciones de los tsunamis argelinos.

6 | Edad de los bloques

La existencia de morfologías exokársticas litorales (cubetas y pozas) postdeposicionales sobre algunos bloques nos permite ensayar una primera aproximación a la cronología de las acumulaciones de bloques. Para ello se considera que la evolución de las cubetas y/o pozas es más o menos constante y a partir de su profundidad y de la tasa de erosión y formación del micromodelado obtenidas por Revelle y Emery (1957) y Gómez-Pujol (2006) en roquedos y contextos similares, se infiere la edad a la que podrían haberse empezado a desarrollar dichas formas. Así las cosas, la movilización de los bloques descritos se podría haber producido hace más de 220 años y podría coincidir con el evento de 1756 registrado en las notas de sismología balear que recoge Fontseré (1918), como una “gran ola sísmica (?)” en Santanyí -municipio de Mallorca-, en donde las crónicas indican la entrada de una ola

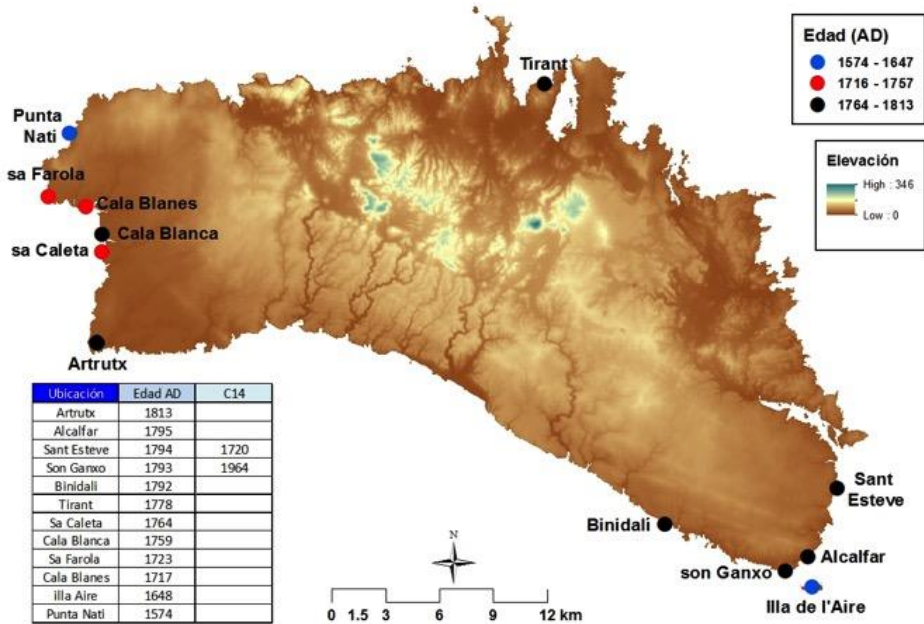


Figura 13. Localización de los bloques datados mediante técnicas ^{14}C e indirectas.
Figure 13. Location of boulders dated by means of ^{14}C techniques or proxies indicators.

de más de media legua (ca. 2,4 km) tierra adentro, dejando una estela de peces en la maquia y con el transporte de un bloque de más de 100 quintales (unas 10 T).

Una datación mediante C^{14} de organismos marinos incrustados (serpúlidos) en uno de los bloques de cala Sant Esteve arrojó una edad de 1720 años (Fig. 13). Otra datación de organismos incrustados en un bloque en son Ganxo (Fig. 13) dio una edad de 1964 y corresponde a un fragmento de entalladura (*notch*) arrancado del acantilado de la zona.

7 | Propuesta de un modelo evolutivo asociado a diferentes eventos de tsunami sobre la costa rocosa

Los análisis morfométricos, así como las aproximaciones cronológicas, apuntan a la acción de diferentes eventos tsunamíticos en la costa de Menorca, afectando diferentes localidades y tipologías de acantilados. En base a ello Roig-Munar *et al.* (2016) han propuesto un modelo evolutivo de costa rocosa basado en la alternancia de varios episodios de tsunami (Fig. 14) en el que se podrían distinguir:

Un episodio inicial, Episodio A, donde el acantilado se presenta con paredes verticales desde la cornisa al nivel del mar, configurándose como una plataforma tabular ligeramente inclinada hacia el mar.

Le seguiría un Episodio B en el que un primer tsunami sobre la costa da como resultado el arranque de bloques de la cornisa, a favor de la fracturación y condi-

cionados por juntas. Este primer evento da lugar a la creación de un primer cordón imbricado asociado a la cornisa como área fuente.

La siguiente etapa, Episodio C, consistiría en la acción de un nuevo tsunami sobre la misma costa dando lugar al arranque de un nuevo estrato y el desplazamiento de los bloques subaéreos ya existentes hacia el interior. El resultado sería la creación de diferentes superficies de denudación o áreas fuente asociadas a los bloques trasladados. Sobre estos bloques y las plataformas de denudación se empiezan a dar procesos de disolución kárstica mediante pozas o cubetas, así como la removilización de pequeños fragmentos de bloques o de sedimento en las costas más bajas.

Episodio D: un nuevo evento da lugar a la creación de dos cordones imbricados en la zona más cercana a la cornisa. En este episodio se observan vuelcos y/o presencia de bloques subredondeados que podrían estar asociados a grandes tormentas, las cuales sólo se manifiestan como bloques aislados sin estructuras bien definidas.

Probablemente, en Menorca, los bloques asociados a este modelo corresponden al último evento tsunamítico de grandes proporciones registrado en Baleares, aunque también registran eventos menores posteriores y en algunos casos, el retrabajamiento posterior por temporales más recientes y muy energéticos.

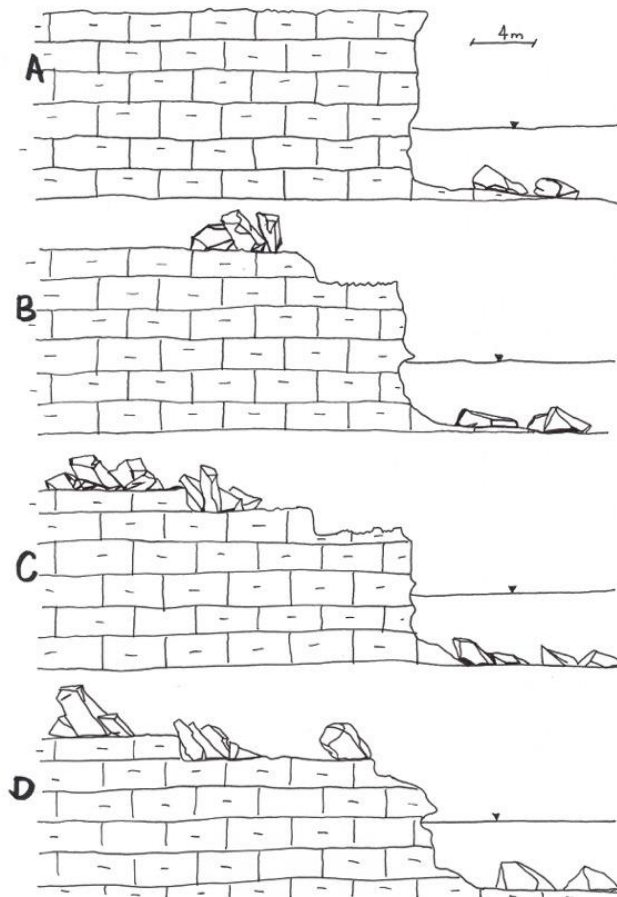


Figura 14. Propuesta de modelo evolutivo de una costa rocosa frente a diferentes eventos tsunamíticos. Inspirado en las localidades de Torre d'Alcalfar y Alcalfar (Menorca).

Figure 14. A proposal schema for the evolution of a rocky coast under the effect of different tsunami events. Inspired in Torre d'Alcalfar and Alcalfar study sites (Menorca).

8 | Discusión

A grandes rasgos, la presencia y distribución espacial de acumulaciones de bloques en las costas rocosas de Menorca coincide con las áreas en las que sería mayor el impacto de las modelizaciones y propagación de ondas de tsunami de realizadas por Roger y Hébert (2008), Sahal *et al.* (2009), Álvarez-Gómez *et al.* (2010 y 2011) y por Periañez y Abril (2013). También vendrían a coincidir con los modelos de Schindele *et al.* (2008) Sahal *et al.* (2009) y Schindele *et al.* (2015) y las trayectorias de distorsión del oleaje de tsunamis que afectan el litoral, especialmente en el canal ubicado entre Mallorca y Menorca y en la costa N de Menorca. La ausencia de bloques en otras áreas de la costa N de la isla o en la parte central de la costa S, podría atribuirse a un factor limitante como es la altura y la morfología de los acantilados o su dinamismo y a altas tasas de retroceso en casos particulares (Roig-Munar *et al.*, 2016b), factores que, uno a uno o de forma conjunta, dificultarían encontrar registros de bloques asociados a diferentes flujos, tanto de tormenta como de tsunami.

Los bloques aparecen preferentemente sobre roquedos resistentes, ya sean en costas rocosas labradas sobre materiales carbonatados del Mioceno, calizas del Jurásico o eolianitas, donde la acción de los agentes erosivos es menos efectiva, hecho que ha permitido conservar las acumulaciones sedimentarias de bloques.

Cabe destacar el sector Sudeste, considerado el de mayor incidencia en las islas Baleares de las trayectorias de los tsunamis provenientes de Argelia (Hébert, 2003; Roger y Hébert, 2007; Sahal *et al.*, 2009; Álvarez-Gómez *et al.* 2010; Periañez y Abril 2013). En dicho sector se encuentran los mejores ejemplos de cordones imbricados múltiples (i.e. Sant Esteve, Alcafar e Illa de l'Aire). Los sectores Oeste y Norte presentan procesos mixtos con incidencia de tormenta, retrabajamientos y orientaciones de los bloques menores que denotan la incidencia del oleaje. No obstante, las orientaciones de los bloques con $TF > 1.000$ podrían constituir el testimonio de las refracciones definidas en estas áreas por Álvarez-Gómez *et al.* (2010, 2011).

Tanto las ecuaciones hidrodinámicas de los bloques con $TF > 1.000$, como el perfil de cada área, nos informan de donde se pueden dar procesos mixtos de tsunami y tormenta, como es el caso de las rampas de los sectores SE y W, o en aquellas localidades en las que los bloques de tsunami se sitúan en las zonas más altas del perfil.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer al Dr. J.A. Álvarez-Gómez la autorización para el uso y reproducción de la figuras 1 y 2, así como al Dr. L. Gómez-Pujol las sugerencias y comentarios críticos a propósito de la versión preliminar del presente trabajo.

Referencias

- Alasset, J. P., Hebert, H., Maoche, 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.
- 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.

- Álvarez-Gómez, J. A., Olabarrieta, M., González, M., Otero, L., Carreño, E. y 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.
- 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.
- Biolchi, S., Furlani, S., Antonioli, F., Baldassini, N., Causon Deguara, J., Devoto, S., Di Stefano, A., Evans, J., Gambin, T., Gauci, R., Mastronuzzi, 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.
- Canals, M., Lastras, G., Urgeles, R., Casamor, J. L., Mienert, J., Cattaneo, A., De Batis, M., Haflidason, H., Imbo, Y., Laberg, J. S., Locat, J., Long, D., Longva, O., Masson, D. G., Sultan, N., Trincardi, F. y Bryn, P. (2004): Slope failure dynamics and impact from seafloor and shallow sub-seafloor geophysical data: case studies from the COSTA project. *Marine Geology*, 213: 9-72.
- Cañellas, B. (2010): *Long-term extreme wave height events in the Balearic Sea: characterization, variability and prediction*. Tesis doctoral, Palma, Universitat de les Illes Balears, 71 pp.
- Cañellas, B., Orfila, A., Méndez, F. J., Menéndez, M., Gómez-Pujol, L. 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*, SI50: 329-333.
- 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.
- 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.
- Furlani, S., Papalardo, M., Gómez-Pujol, L. y Debrat, M. (2014): The rock coast of the Mediterranean and Black seas. En: Kenedy, D., Stephenson, W.J., Naylor, L. (eds.), *Rocky coast geomorphology, a global synthesis*: 77-87. London, Geological Society of London.
- Gelabert, B., Fornós, J. J., Pardo, J. E., Rosselló, V. M. y Segura, F. S. (2005): Structural controlled drainage basin development in the South of Menorca island (Spain). *Geomorphology*, 65: 139-155.
- Gómez-Pujol, L. (2006). *Patrons, taxes i formes d'erosió a les costes rocoses carbonatades de Mallorca*. Tesis doctoral. Departament de Ciències de la Terra, Palma, Universitat de les Illes Balears. 200 pp.
- Gómez-Pujol, L. y Roig-Munar, F. X. (2013): Acumulaciones de grandes bloques en las crestas de los acantilados del sur de Menorca (Illes Balears): observaciones preliminares. *Geo-Temas*, 14: 71-74.
- 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.
- Hebert, H. y Alasset, P. J. (2003): The Tsunami Triggered by the 21 May 2003 Algiers Earthquake. *EMSC Newsletter, Centre Sismologique Euro-Méditerranéen*, 20: 10-12.
- Iglesias, O., 2015. *Generación y propagación de tsunamis en el mar catalano-balear*. Tesis Doctoral. Barcelona, Universidad de Barcelona. 247 pp.
- Kelletat, D. (2005): Neue Beobachtungen zu Paläo-Tsunami im Mittelmeergebiet, Mallorca und Bucht von Alanya, türkische Südküste. *Schriften des Arbeitskreises Landes- und Volkskunde Koblenz (ALV)*, 4: 1-14.
- 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.
- Lastras, G., Canals, M., Urgeles, R., Hughes-Clarke, J. E. y Acosta, J. (2004b). Shallow slides and pockmark swarms in the Eivissa Channel, western Mediterranean Sea. *Sedimentology*, 51: 1-14.
- 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.

- Mastronuzzi, G., Pignatelli, C., Sanso, P. y Selleri, G. (2007): Boulder accumulations produced by the 20th February 1743 tsunami along the coast of SouthEastern Salento (Apulia region, Italy). *Marine Geology*, 242, 191-205.
- 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.
- Periáñez, R. y Abril, J. M. (2013): Modeling tsunami propagation in the Iberia-Africa plate boundary: Historical events, regional exposure and the case-study of the former Gulf of Tartessos. *Journal of Marine Systems*, 111-112: 223-234.
- Pignatelli, C., Sanso, P. y Mastronuzzi, G. (2009): Evaluation of tsunami flooding using geomorphologic evidence. *Marine Geology*, 260, 6-18.
- Revella, R. y Emery, K.O. (1957): Chemical erosion of Beach rock and exposed reef rock. *US Geological Survey Professional Paper*, 260T: 699-709.
- Robinson, E., Khan, S., Rowe, D. A. y Coton, R. (2008): Size of boulders moved and emplaced by recent hurricanes, Jamaica. En: 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.
- Roig-Munar, F. X. (2016): *Blocs de tempesta i tsunamis a les costes rocoses de les Illes Balears. Anàlisi geomorfològica i morfomètrica*. Tesis doctoral inédita. Departament de Geodinàmica i Geofísica, Barcelona, Universitat de Barcelona. 410 pp.
- 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). *Geotemas*, 15: 229-232.
- Roig-Munar, F. X., Rodríguez-Perea, A., Martín-Prieto, J. A., Vilaplana, J. M., Gelabert, B., Pons, G. X. y Mir-Gual, M. (2014): Presencia de bloques de tsunamis en las costas rocosas del SE de Menorca (I. Baleares). En: Álvarez-Gómez, J. A. y Martín-González, F. (eds.), *Una aproximación multidisciplinaria al estudio de las fallas activas, los terremotos y el riesgo sísmico*: 125-128. Lorca, Universidad de Murcia.
- Roig-Munar, F. X., Vilaplana, J.M, Rodríguez-Perea, A., Martín-Prieto, J.A y Gelabert, B. (2016b): Indicadores geomorfológicos de tsunamis históricos en las costas rocosas de Baleares. *Geotemas*, 16 (1): 641-644
- 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). En: Durán J. J., Montes Santiago M., Robador A. y Salazar Á. (eds.), *Comprendiendo el relieve: del pasado al futuro*: 571-578. Madrid, IGME.
- 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 modelling. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9, 1823-1834.
- 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.
- Scheffers, A. y Kelletat, D. (2003): Sedimentologic and geomorphic tsunami imprints worldwide- a review. *Earth-Science Review*, 63: 83-92.
- Schindele, F., Gailler, A., Hébert, H., Loevenbruck, A., Gutiérrez, E., Monnier, A., Roudil, P., Reymond, D. y RiverA, L. (2015): Implementation and Challenges of the Tsunami Warning System in the Western Mediterranean. *Pure and Applied Geophysics*, 172: 821-833
- Schindele, F., Loevenbruck, A. y Hébert, H. (2008): Strategy to design the sea-level monitoring networks for small tsunamigenic oceanic basins: the Western Mediterranean case. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8: 1019-1027.

Segura, F. y Pardo, J. (2003): Los barrancos del Migjorn de Menorca. En: Rosselló, V.M., Fornós, J.J. y Gómez-Pujol, L. (eds.), *Introducción a la Geografía Física de Menorca*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 8: 71-86. Palma, AGE, Universitat de València, Universitat de les Illes Balears, Societat d'Història Natural de les Balears.