

## Indicadores geomorfológicos de tsunamis históricos en las costas rocosas de Baleares

### *Geomorphological indicators of historical tsunamis in the rocky shores of the Balearic Islands*

F.X. Roig-Munar<sup>1</sup>, J.M. Vilaplana<sup>2</sup>, A. Rodríguez-Perea<sup>3</sup>, J. A. Martín-Prieto<sup>1</sup> y B. Gelabert<sup>4</sup>

1 QU4TRE, consultoria ambiental / AXIAL, geología i medi ambient. Carritxaret 18.6, es Migjorn Gran, Menorca 07749 Xiscoroig@gmail.com

2 Dpto. de Geodinámica y Geofísica, Grupo RISKINAT, Universitat de Barcelona. Martí i Franquès, s/n 08028 Barcelona nue.vilaplana@ub.edu

3 Dpto. de Geografía, 4 Dpto. de Biología, Universitat de les Illes Balears, Palma de Mallorca. Carretera de Valldemossa, km 7,5

**Resumen:** Este trabajo sintetiza los resultados del análisis geológico, geomorfológico y morfométrico de 50 áreas de estudio, repartidas entre las islas de Menorca, Mallorca, Ibiza y Formentera, donde aparecen grandes bloques sobre terrazas litorales. Se sitúan sobre las amplias plataformas que conforman algunas costas rocosas de las Islas Baleares y a distancias mayores a los 50 m del borde del acantilado, a alturas incluso superiores a los 15 m y a kilómetros de distancia de cualquier otro escarpe tierra adentro. Se presentan a veces como cordones de grandes bloques imbricados y otras como agrupaciones o bloques individuales, y su peso oscila entre 0.5 y 300 toneladas. La localización de estas áreas, mayoritariamente en el sur de las islas, coincide con las zonas de mayor riesgo por tsunami identificadas a partir de modelos numéricos. Tanto la datación de los bloques, su dirección de imbricación, así como el cálculo de las alturas de ola necesarias para su emplazamiento, indican su transporte a partir de tsunamis generados en el norte de África.

**Palabras clave:** bloques, costa rocosa, indicadores, Islas Baleares, tsunamis.

**Abstract:** This paper summarizes the results of geological, geomorphological and morphometric analysis of 50 study areas spread between the islands of Menorca, Mallorca, Ibiza and Formentera, where large blocks appears on top of marine terraces. At distances greater than 50 m from the edge of the cliff, heights even higher than 15 m and kilometers away from any other inland escarpment, there has been registered the presence of large imbricated blocks (between 0.5 and 300 tonnes) located on broad platforms that conform some rocky shores of the Balearic Islands. The location of these areas, mostly in the southeast of the islands, coincides with the higher tsunami risk areas identified from digital models. Both the dating of the blocks, its direction of imbrication and the calculated wave heights necessary for placement, indicate transport from tsunamis generated in North Africa.

**Key words:** Balearic islands, blocks, geoindicators, rocky coast, tsunamis.

### INTRODUCCIÓN

El registro sedimentario de los tsunamis generados en el norte de África ha podido reconocerse en las costas rocosas de las Islas Baleares. Se trata de bloques de orden métrico, que arrancados del borde del acantilado, son transportados tierra adentro. Se encuentran mayoritariamente sobre terrazas rocosas litorales del SE de las Islas, frecuentemente situadas por encima del nivel de oleaje máximo registrado y sin que existan relieves que puedan explicar su emplazamiento por caídas gravitacionales. Ocasionalmente, bloques sobre acantilados bajos o en rampas, han sido retrabajados por el oleaje.

### MARCO GEOLÓGICO Y ANTECEDENTES

La sismicidad histórica e instrumental indica que el N de Argelia está expuesto a peligros y riesgos sísmicos relevantes. El 10 de octubre de 1980 tuvo lugar el terremoto de Asnam, con una magnitud de 7,3 Mw. El último evento sísmico registrado fue el de

Zemmouri del 21 de mayo de 2003, con una magnitud de 6.9 Mw. Este terremoto fue generado por una falla inversa, dando lugar a una deformación significativa del fondo marino, responsable del tsunami que se observó en Argelia y España, y llegó a las costas de Francia e Italia. Las olas máximas registradas fueron de 2 m en las islas Baleares, con daños materiales en algunos puertos de Menorca, Mallorca e Ibiza. Las simulaciones de este tsunami fueron realizadas por varios autores (Hébert y Alasset, 2003; Alasset et al., 2006).

Álvarez et al. (2011) modelizó los posibles tsunamis generados por fuentes cercanas a las Islas Baleares, con el objetivo de identificar las áreas donde el riesgo e impacto de los tsunamis es mayor. En la región mediterránea los tsunamis generados por los terremotos se espera que presenten longitudes de onda entre 5 y 20 km, mientras que las máximas profundidades de agua son del orden de 3 km. Álvarez et al. (2011) generó un mapa de nueve fuentes tsunamíticas con características similares a las

responsables de los terremotos de al-Asnam, 1980 y Boummerdes-Zemmouri, 2003. Estas fuentes representan fallas inversas con bajo ángulo de buzamiento hacia el S y SE, que son capaces de generar terremotos de intensidad 7.3 Mw. Estas fallas delimitan el N del cinturón de deformación de los materiales del Atlas del Norte de África empujando sobre la cuenca argelino-balear. El tsunami generado por estas fuentes llega en 30 minutos a Formentera, que es la más cercana de las Islas Baleares a la costa de Argelia, y el tiempo de llegada hasta a Menorca, la isla más lejana, es de aproximadamente 45 minutos (Roger y Hebert, 2008).

La presencia de bloques en las costas rocosas de Baleares ha sido tratada por Bartel y Kelletat (2003), Kellet et al. (2005) y por Scheffers y Kelletat (2003) en algunas áreas de Mallorca, relacionando bloques sobre plataformas con procesos mixtos de oleaje y tsunamis y estableciendo ecuaciones simples para discernir los bloques desplazados por unos fenómenos de otros. Posteriormente entre el 2013 y el 2016 se fueron analizando los bloques de la costa Sur de Menorca, del levante de Mallorca y del resto del litoral de las Baleares, aplicando diferentes ecuaciones para distinguir entre los bloques asociados a las tormentas y los bloques de tsunamis, y la relación de estos últimos con trayectorias de tsunamis provenientes del Norte de África (Roig-Munar, 2016).

## METODOLOGÍA Y RESULTADOS

En este trabajo se han analizado 4.010 bloques en 50 áreas de estudio de las islas Baleares (Figura 1). Se han medido sus dimensiones, altura a la que se encuentran y distancia del borde del acantilado. Se ha

considerado su disposición (orientación, imbricación, etc.) y el contexto geomorfológico en el que se encuentran. Para valorar la energía necesaria para arrancar y transportar cada bloque se ha utilizado el *Transport Figure* (TF) basándonos en la ecuación de Scheffers y Keletat (2003) (Figura 2). La ecuación del TF se basa en un producto que tiene en cuenta la altura del bloque sobre el nivel del mar, su distancia de la cornisa del acantilado y su peso. En este trabajo se ha estimado un  $TF > 1000$  como valor indicativo de tsunami; cuatro veces por encima del considerado por los autores anteriores. Además, en 13 de las áreas inventariadas, los bloques se encuentran sobre acantilados por encima del nivel del oleaje máximo registrado (Cañellas, 2001).

En algunos casos, la discriminación entre bloques transportados por tsunamis o por tormentas plantea dificultades (Kellet, 2008; Barbano et al., 2010) Aunque en numerosos puntos del Mediterráneo muchos bloques de tamaño métrico han sido interpretados como restos de los tsunamis acontecidos en los últimos siglos (Pignatelli et al., 2009).

El 8,23% de los bloques se encuentran en áreas por encima de la máxima altura de oleaje registrado y presentan  $TF > 1000$ . Estos depósitos han de considerarse claramente producto de tsunamis. Otro 24,7% de los bloques se encuentran en zonas mixtas, con  $TF > 1000$  pero con alturas de acantilado accesibles a los temporales, en ellas además de la acción de los tsunamis, encontramos evidencias del oleaje que, en algunos casos, ha retocado los bloques. En el resto de las áreas su atribución genética ha de establecerse por la confluencia de criterios diversos.

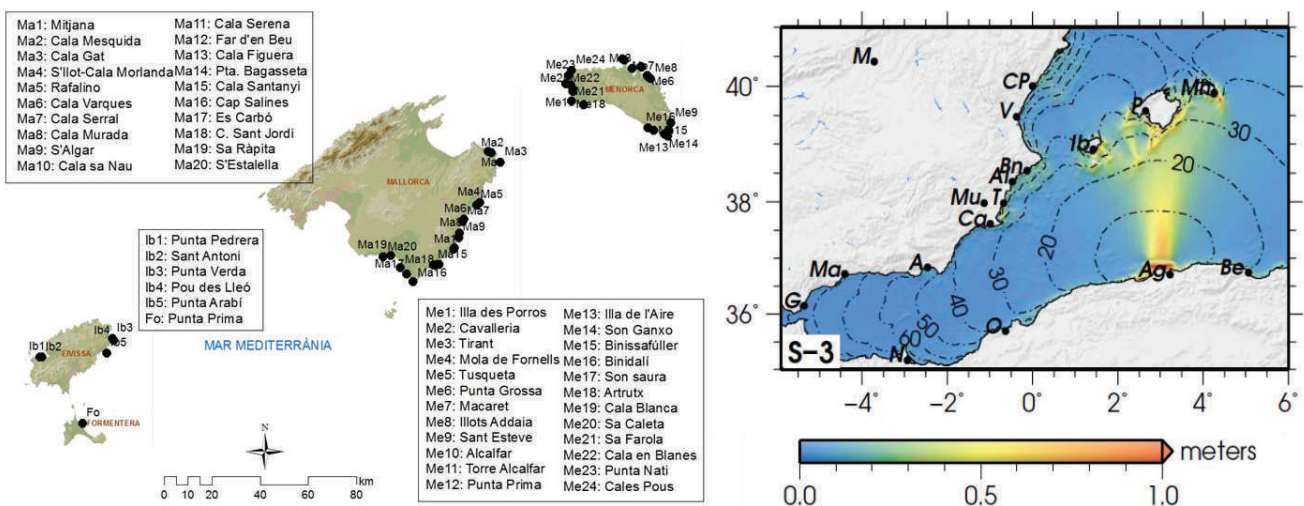


FIGURA 1. Ubicación de las áreas de estudio y simulación del alcance y de los isotiempas de un tsunami a partir de la fuente S-3 de Álvarez et al. (2011)

Además del TF, se han aplicado diversas ecuaciones para establecer el flujo de agua necesario

para arrancar y/o desplazar cada bloque. De la formulación de Engel y May (2012) resulta que, los

bloques de  $TF > 1000$ , con columnas de agua entre 6 y 15 m s.n.m. corresponden a tsunamis y los situados entre 16 y 23 m s.n.m. corresponden a temporales. Dado que los bloques no registran un único tsunami o temporal, puede estimarse un valor para el tsunami más intenso, aquél que al impactar sobre el acantilado inunda por encima de 15 m, donde los eventos anteriores y de menor magnitud tienen muy pocas posibilidades de quedar registrados ya que son re TRABAJADOS.

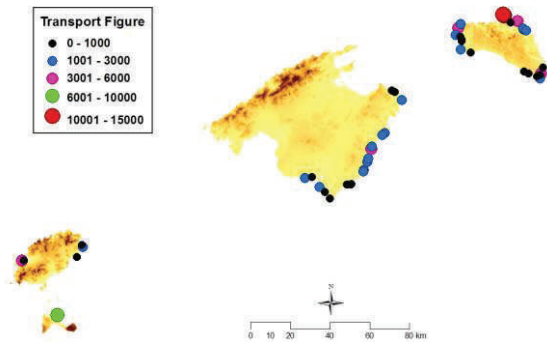


FIGURA 2. Valores del Transport Figure en las áreas estudiadas

Cinco de los bloques analizados presentan fauna marina. Son bloques arrancados de la zona sumergida y depositados sobre el acantilado. El bloque de Sant Esteve (SE de Menorca) se encuentra a unos 19 m de la línea de costa y 1 m s.n.m, con un peso de 43,15 T se ha datado por  $^{14}C$  en el 1720AD. Otro bloque en Son Ganxo corresponde a un fragmento de muesca litoral (*wave-cut notch*) y la datación por  $^{14}C$  le atribuye una edad de 1964AD.

Para saber la edad de sedimentación de los bloques se han realizado dataciones mediante la tasa de disolución cársica de *gnammas* (*panholes or solution pans*) postdeposicionales, estimada en 0,3 mm/a (Emery, 1946; Gómez-Pujol et al., 2002). Se han datado varios bloques (entre 4 y 30) en 17 localidades. Se trata de bloques situados en la zona de spray que muestran edades promedio entre 1574 y 1813 AD, aunque 13 de las 17 dataciones realizadas se sitúan alrededor del año 1790AD (Figura 3).

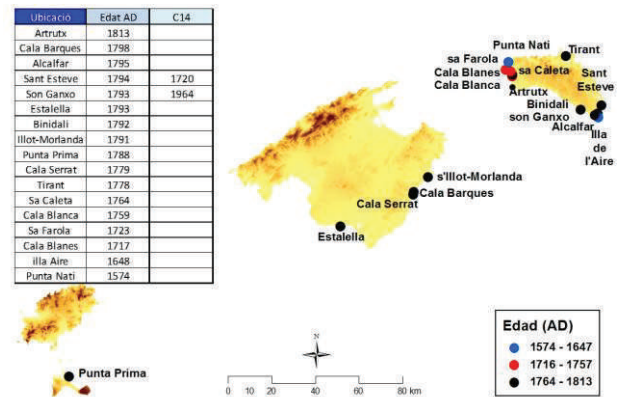


FIGURA 3. Situación y edades de las localidades datadas por *cocons*

En la localidad de St. Esteve (Menorca) se pudo datar un organismo incrustante de un bloque con  $^{14}C$ , dando una edad más joven de 1720AD. Si la comparamos con las edades obtenidas en la misma localidad a partir de la disolución de las *gnammas* (Figura 3), observamos unos resultados coherentes. Asimismo la correlación de las dataciones de bloques con datos de registros documentales de terremotos y tsunamis asociados (Fontseré, 1918; Martínez-Solares, 2001; Silva y Rodríguez, 2014) dan consistencia al conjunto de la cronología.

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Se propone un modelo evolutivo de acantilados de entre 7 y 8 m de altura afectados por tsunamis diferenciando varios episodios (Figura 5):

- Episodio A: el acantilado se presenta con paredes verticales desde la cornisa al nivel del mar, configurándose como una plataforma tabular ligeramente inclinada hacia el mar.
- Episodio B: un primer tsunami sobre la costa da como resultado el arranque de bloques de la cornisa de los acantilados, a favor de la fracturación, condicionados por juntas. Este primer evento da lugar a la creación de un primer cordón imbricado asociado a la cornisa como área fuente (Figura 4).



FIGURA 4. A) Bloques imbricados en Alcafar (SE de Menorca); B) Cordón de bloques imbricados en Sant Esteve (SE de Menorca)



- Episodio C: un nuevo tsunami sobre la misma costa da lugar al arranque de un nuevo estrato y el desplazamiento de bloques subaéreos, ya existentes, hacia el interior. El resultado de este episodio es la creación de diferentes campos de denudación o áreas fuente asociadas a los bloques trasladados. Sobre éstos bloques y las plataformas de denudación se empiezan a dar procesos de disolución kársticas (*gnammas*), así como a removilizaciones de pequeños fragmentos de bloques o de sedimento.

- Episodio D: un nuevo evento afecta la costa dando lugar a la creación de dos cordones imbricados en la zona más cercana a la cornisa. A medida que los eventos se dan sobre la costa rocosa ésta pierde altura en su contacto de la cornisa con el mar. 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.

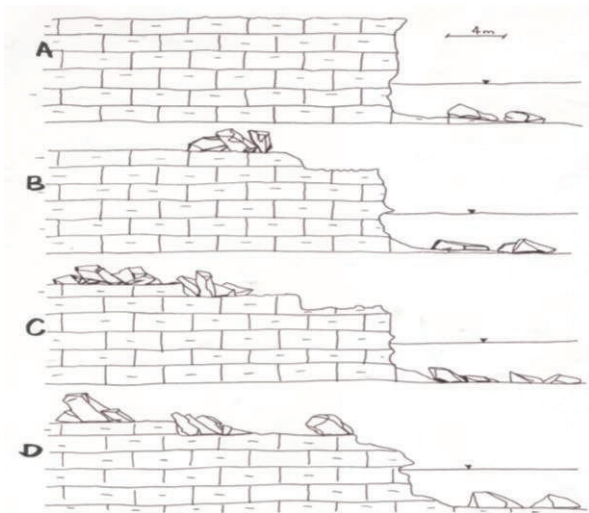


FIGURA 5. Propuesta del modelo evolutivo de una costa rocosa sometida a diferentes episodios de tsunami.

De acuerdo con los resultados obtenidos con los diferentes métodos de datación utilizados, nos movemos en edades entre 1574 y 1813. En Menorca se han detectado cinco eventos situados entre 1600 y 1750, mientras que en Mallorca se encuentran entre 1750 y 1850. El hecho de no haber encontrado bloques datables anteriores al s. XVI puede atribuirse tanto a causas naturales como antrópicas, tales como:

1. Los tsunamis más recientes de mayor magnitud reabajan los depósitos anteriores y son los que finalmente se han datado.

- 2.- El grado de antropización reciente de la costa balear, focalizada en el uso turístico ha dado lugar a la desaparición o alteración de numerosos restos de bloques.

En definitiva, los grandes bloques que se encuentran sobre las terrazas litorales del SE de las Baleares, lejos que cualquier escarpe, provienen de los

flujos producidos por tsunamis generados por la actividad sísmica en el N de Argelia. Tanto su situación sobre acantilados de altura superior al nivel del oleaje máximo registrado, como su tamaño, su orientación, su imbricación o su distancia al cantil de los acantilados explican dicho origen. Además, la concordancia entre las dataciones efectuadas y los eventos históricos registrados confirman tal interpretación.

Probablemente corresponden al último evento tsunamítico de grandes proporciones registrado en las Islas Baleares, coetáneo con el de Lisboa y recogido en crónicas históricas, aunque también registran eventos menores posteriores y en algunos casos, el reabajamiento posterior por temporales de grandes magnitudes y más recientes.

## AGRADECIMIENTOS

Esta presentación se ha realizado gracias al apoyo financiero del Proyecto CHARMA (MINECO, Ref.: CGL2013-40828-R).

## REFERENCIAS

- Álvarez-Gómez, J. A., Aniel-Quiroga, I., González, M., Otero 2011. The impact of tsunamis on the Island of Majorca induced by North Algerian seismic sources. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 19:367-383.
- Tsunami hazard at the Western Mediterranean Spanish coast from seismic sources. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11, 227-240
- Cañelles, 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.
- Emery, K. O. 1946. Marine solution basins. *Journal of Geology*, 54: 209-228.
- 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.
- Pignatelli, C., Sanso, P. y Mastronuzzi, G. 2009. Evaluation of tsunami flooding using geomorphologic evidence. *Marine Geology*, 260, 6-18.
- Roig-Munar, F. X. 2016. Blocs de tempesta i tsunami a les costes rocoses de les Illes Balears. Anàlisi geomorfològica i morfomètrica. *Tesi doctoral*. Departament de Geodinàmica i Geofísica. Universitat de Barcelona. 410 pp.
- 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.
- Schepfers, A. y Kelletat, D. 2003. Sedimentologic and geomorphic tsunami imprints worldwide - a review. *Earth-Science Review*, 63, 83-92.