

Els blocs de tsunamis de les costes rocoses de les Illes Balears

Francesc X. ROIG-MUNAR, José Á. MARTÍN-PRieto, Antonio RODRÍGUEZ-PEREA, Bernadí GELABERT i Joan Manel VILAPLANA

SHNB



SOCIETAT D'HISTÒRIA
NATURAL DE LES BALEARS

Roig-Munar, F.X., Martín-Prieto, J.Á., Rodríguez-Perea, A., Gelabert, B. i Vilaplana, J.M. 2021. Els blocs de tsunamis de les costes rocoses de les Illes Balears. In: Pons, G.X., Vicens D. i del Valle, L. (edit.). La Història Natural de les Balears i Andreu Muntaner Darder. *Mon. Soc. Hist. Nat. Balears*, 33: 261-281. ISBN 978-84-09-33509-1. Palma (Illes Balears).

La presència de blocs de grans dimensions a les costes rocoses de les Illes Balears es relaciona amb els efectes dels tsunamis que des del Nord d'Àfrica afecten a les Balears. Molts dels blocs ubicats sobre les costes rocoses meridionals de les Balears, i amb unes característiques geomorfològiques concretes, corresponen a dipòsits de tsunami, tot i que l'ample mostreig realitzat a Balears permet l'estudi simultani de fenòmens de tempesta i de tsunami. Els resultats ens mostren àrees ubicades sobre penya-segats verticals amb presència de grans blocs imbricats i amb morfologies de cordons on no hi arriben els onatges de tempesta, configurant-se com a àrees eminentment tsunamítiques i on les orientacions dominants indiquen el N d'Àfrica.

Paraules clau: *Illes Balears, costa rocosa, blocs, tsunami, tempestes.*

THE TSUNAMI BLOCKS OF THE ROCKY COASTS OF THE BALEARIC ISLANDS. The presence of boulders of large dimensions at the rocky coasts of the Balearic Islands is related to the effects of the tsunamis that affect the Balearic Islands from North Africa. Many boulders located on the southern rocky coasts of the Balearic Islands, with specific geomorphological characteristics, correspond to tsunami deposits, although the wide sampling made in the Balearic Islands allows for the simultaneous study of storm and tsunami phenomena. The results show areas located on vertical cliffs, with the presence of large imbricated boulders with ridge morphologies where storm surges do not reach, configuring themselves as eminently tsunamitic areas, and where dominant directions indicate north Africa.

Keywords: *Balearic Islands, rocky coast, blocks, tsunami, storms.*

Francesc X. ROIG-MUNAR, *Consultor ambiental en QUATRE, investigador independent. C/ Carritxaret 18-6, es Migjorn Gran, 07749 Menorca, xiscoroig@gmail.com.* José Á. MARTÍN-PRieto i Antonio RODRÍGUEZ-PEREA. *Dpto. de Geografia, Universitat de les Illes Balears, Carretera de Valldemossa, km 7,5, Palma de Mallorca.* Bernadí GELABERT. *Dpto. de Biología, Universitat de les Illes Balears, Carretera de Valldemossa, km 7,5, Palma de Mallorca.* Joan Manel VILAPLANA. *Dpto. de Dinámica de la Tierra y del Océano, Grupo RISKMAT, Universitat de Barcelona. Martí i Franquès, s/n, 08028 Barcelona*

Introducció

Antecedents a l'estudi de blocs a les Illes Balears

La presència de blocs de tsunamis a les costes rocoses ha estat un tema recent en la producció científica, tot i que Cuerda *et al.* (1991) i Gracia i Vicens (1998) ja citaven la

presència de grans blocs associats a l'erosió marina a les plataformes marines de les costes de Mallorca. El seu origen tsunamític ha estat tractat per Bartel i Kelletat (2003), Scheffers i Kelletat (2003) i Kelletat *et al.* (2005) a algunes àrees de Mallorca. Aquests autors relacionen els grans blocs sobre plataformes carbonatades a processos mixtes d'onatge i tsunamis, establint equacions per discernir els blocs desplaçats per uns fenòmens dels altres. Posteriorment Femenias (2007) realitzà una anàlisi de blocs de grans dimensions del Cap Salines, Sud de Mallorca, amb l'aplicació de diferents equacions, arribant a la conclusió que eren blocs fruit de tsunamis. Corrales (2015) analitzà, seguint les propostes de Femenias (2007), la possible presència de blocs a la zona submergida de Cap Salines, detectant també blocs de grans dimensions amb l'escaneig batimètric. Gómez-Pujol i Roig-Munar (2013) realitzaren una primera aproximació de l'origen dels blocs a la costa Sud de Menorca, atribuint-lo a processos d'onatges. Posteriorment, Roig-Munar *et al.* (2013; 2014; 2015) realitzaren estudis sobre els grans blocs de les costes de Menorca i Mallorca, que van ampliar a la resta de les Illes Balears, aplicant diferents equacions per tal de distingir entre els blocs associats a tempestes i tsunamis. També analitzaren la relació d'aquests darrers amb les trajectòries de tsunamis provinents del Nord d'Àfrica (Roig-Munar, 2016). Roig-Munar *et al.* (2017a) i Martín-Prieto *et al.* (2018) realitzaren anàlisis morfològiques de blocs associats a tempestes d'incidència directa a Menorca i Mallorca per valorar el seu efecte sobre les costes rocoses amb presència de blocs. Recentment, Roig-Munar *et al.* (2018, 2019a; 2019b) analitzaren les hipòtesis hidrodinàmiques dels blocs aplicant-lis equacions, una més acurada estimació dels volums de blocs i l'alçada dels penya-segats per tal d'establir millor el seu *run-up*.

Context geològic i fisiogràfic

La conca mediterrània es caracteritza per una tectònica molt complexa que es pot descriure en el marc de la col·lisió entre les plaques euroasiàtica i africana (Henares *et al.*, 2003). Les característiques generals d'aquesta situació, en un marc geotectònic compressiu, cobreixen tots els fenòmens, sísmic, volcànic i/o gravitacional, que podrien generar un tsunami (Marone *et al.*, 2004).

Sismicitat i activitat de tsunamis al Mediterrani

La sismicitat històrica i instrumental indiquen que el Nord d'Algèria està exposada a perills i riscos sísmics rellevants (Harbi *et al.*, 2003). L'esdeveniment més gran, entre els més recents registrats, és el terratrèmol de Asnam, del 10 d'octubre de 1980, amb una magnitud de 7,3, i l'últim va ser el de Zemmouri del 21 de maig de 2003, amb una magnitud de 6,9. Aquest darrer va generar un tsunami que es va observar a Algèria, a les Balears, a la Península Ibèrica, i va arribar fins les costes de França i Itàlia. A les Illes Balears les ones màximes registrades foren de 3 m, i els danys materials foren importants a alguns ports de Menorca, Mallorca i Eivissa. Les simulacions d'aquest tsunami foren realitzades per diversos autors (Hébert i Alasset, 2003; Alasset *et al.*, 2006) i la conclusió general d'aquests estudis és que el terratrèmol va ser generat per una falla inversa localitzada dins del mar al nord d'Àfrica, donant lloc a una deformació significativa del fons marí, responsable del tsunami.

Propagació de tsunamis a traves de la Mediterrània

Tinti *et al.* (2005) estableixen un escenari tsunamític al nord d'Algèria on la font del terratrèmol no està completament situat en alta mar sinó més freqüentment a la plataforma continental, i on una part de la deformació afecta el fons, i per tant disponible per a la generació de tsunamis. La ona del tsunami impacta, en primer lloc, a les Illes Balears i, a causa de la morfologia de la conca, els fronts principals de tsunamis s'allarguen més o menys en direcció nord. Hi ha, per tant, una direcció preferencial de propagació de l'energia des de la regió d'origen, al N d'Algèria, cap a les Illes Balears i, per tant, el tsunami del 21 maig 2003 produí efectes catastròfics importants especialment sobre les costes de Mallorca i Menorca (Hebert i Alasset, 2003).

Durant els darrers segles les Illes Balears s'han vist afectades per l'ocurrència d'altres tsunamis originats al llarg de la costa del N d'Àfrica, principalment a la costa algeriana (Martínez-Solares, 2001). Almenys quatre esdeveniments han estat catalogats als anys 1756, 1856, 1980 i 2003. Hi ha poca informació sobre el primer esdeveniment, i tot i que la fiabilitat de la font és baixa (Martínez-Solares i Mezcuca-Rodríguez, 2002), hem de fer esment a les fonts de Fontseré (1918) que recull per l'any 1756 una ona sísmica amb entrada d'uns 2,4 km terra endins al municipi de Santanyí (Mallorca) i el transport de blocs de més de 10 T. Per l'esdeveniment de 1856 la informació sobre els danys es refereix principalment a la costa algeriana, a la zona de Jijel i Bugia i que va a afectar principalment a la costa est de Menorca. El 1980 els mareògrafs de les Illes Balears registraren variacions en l'amplitud d'ona conseqüència del terratrèmol d'Asnam de magnitud 7.3 i amb epicentre a 30-40 km terra endins des de la costa (Ouyed *et al.* 1981).

Modelització de tsunamis que afecten les Illes Balears

Segons les modelitzacions de Tinti *et al.* (2005) a la regió mediterrània, els tsunamis generats pels terratrèmols s'espera que presentin longituds d'ona entre 5 i 20 km, mentre que les màximes profunditats d'aigua són de l'ordre de 3 km (Wang i Liu, 2005). Aquestes modelitzacions numèriques han estat aplicades sobre la base de l'estudi de diferents events i del seu impacte (Hébert i Alasset 2003; Wang i Liu 2005; Alasset *et al.*, 2006). Roger i Hebert (2008) també realitzaren la modelització del tsunami de 1856 i la seva propagació cap a les Illes Balears. Els primers resultats mostraren que la propagació d'aquest tsunami s'orientà cap al S de França i cap a les Balears, principalment al llarg de la costa E de Mallorca i del SE de Menorca, amb exclusió d'Eivissa i Formentera.

Pel que fa al terratrèmol de Boumerdès-Zemmouri, del 21 de maig de 2003, i que afectà la costa de les Illes Balears, s'han suggerit diversos mecanismes de generació, segons els diferents paràmetres de la font tsunamítica. Álvarez *et al.* (2011) realitzaren una modelització més general (Fig. 1) dels possibles tsunamis generats per fonts properes a la península Ibèrica i a les Illes Balears; prèviament havien modelitzat el cas de Mallorca (Álvarez *et al.*, 2010).

Els resultats obtinguts amb les modelitzacions mostren mapes d'elevació màxima d'ona i de temps de viatge de tsunamis (Fig. 1). Aquestes modelitzacions es presenten generant un mapa per cada una de les nou fonts tsunamítiques definides per Álvarez *et al.* (2011). En el cas de les fonts situades a l'oest d'Alger, aquestes afecten principalment a les illes d'Eivissa i Formentera. La font S-0 pot generar una ona màxima d'elevacions de poc més de 0,5 m a la costa de Formentera, mentre que la font S-1 produeix elevacions màximes d'1 m a Eivis-

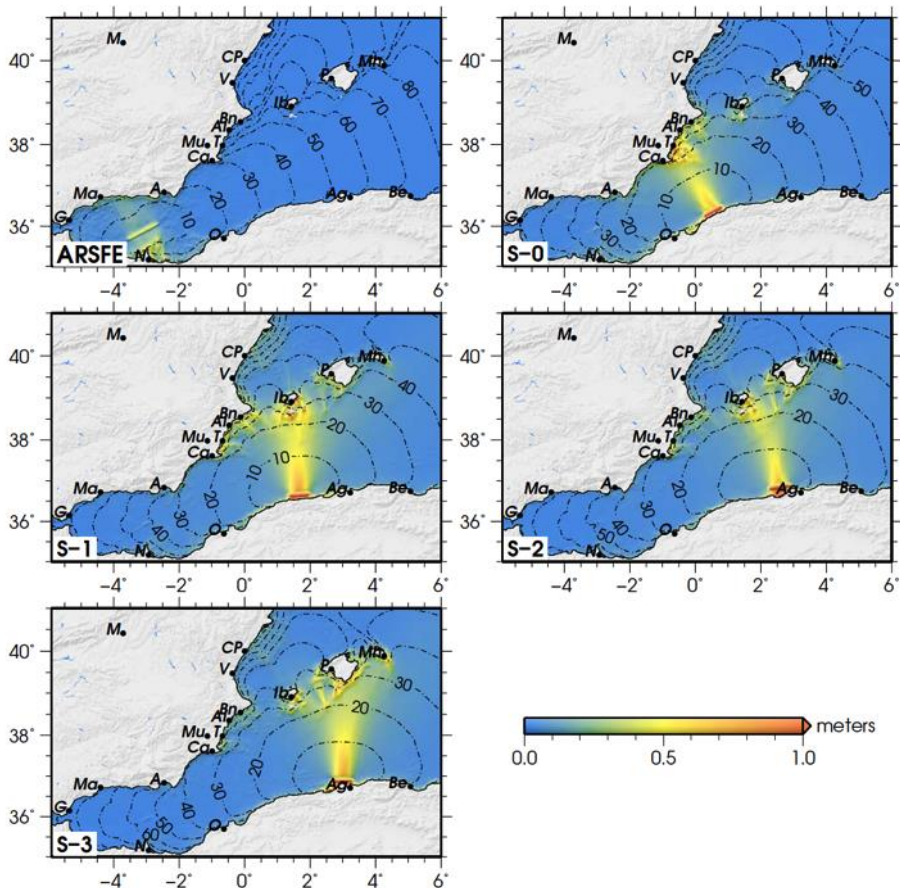


Fig. 1. Mapes regionals d'elevació màxima d'ona de la font tsunàmica del mar d'Alborán i per les diverses fonts nord-algerianes. La variació de color indica l'elevació màxima de l'ona. Les línies de punts són els fronts d'ona en diferents intervals de temps des de la generació del tsunami, en minuts. Font Álvarez *et al.* (2011).

Fig. 1. Regional maps of maximum wave elevation for tsunamitic sources of the Alborán Sea and North Algeria shelf. The color variation indicates the maximum elevation of the wave. The dotted lines are the wave fronts at different time intervals since the tsunami generation, in minutes. Source Álvarez *et al.* (2011).

sa i Formentera. La font S-2 afecta al SE de les Pitiüses i al SW de Mallorca, mentre que la S-3 es la que impacta més directament el Sud de Mallorca. El tsunami que viatja des de la font S-1 triga uns 25 minuts, de S-2 tarda uns 30 minuts i des del S-3 entorn 35 minuts en arribar a les Illes. A Formentera, que és la més propera de les Illes Balears a la costa d'Algèria, el tsunami generat per aquestes fonts arriba en menys de 30 minuts, mentre que el temps fins arribar a Menorca, l'illa més remota, és d'aproximadament 40 a 50 minuts. Aquestes estimacions de temps coincideixen amb els models d'estimacions de temps

d'arribada d'ona elaborats per Sahal *et al.* (2009) i Roger i Hebert (2008). Val a dir que aquests valor d'elevació de les onades es calculen a mar obert i que en arribar als penya-segats se produeixen sobre-elevacions o *run-ups* que multipliquen, en funció de la longitud d'ona, varies vegades l'elevació a mar obert.

Règim onatge estimat per a les Balears

La conca de la Mediterrània presenta un clima marítim moderat, amb valors màxims d'alçada d'ona en els darrers 50 anys propers als 10-11 m durant els mesos d'hivern. Cañelles *et al.* (2007) realitzaren una estimació de la variabilitat espacial de la recurrència de 50 anys pel període d'alçada d'ona significativa del mar Balear i de les costes catalanes. Cañelles (2010) definí l'onatge de Balears utilitzant diferents eines de mesura com les boies d'aigües profundes, que proporcionen paràmetres de l'onatge i del vent en temps real, i els comparà amb les dades de boies HIPOCAS (Hindcast of Dynamic Processes of the Ocean and Coastal Areas of Europe). Cañelles *et al.* (2007) i Cañelles (2010) analitzaren l'estimació de les alçades d'ones al mar Balear. D'acord amb aquest model es poden intuir tres zones d'incidència de l'onatge diferenciades que són el SE de les illes de Mallorca i Menorca, el N o NW de les Balears, i el SW de les Pitiüses. Els resultats obtinguts en els darrers 50 anys de període de retorn d'ona significativa són al voltant de 11 m d'alçada al quadrant N de les Illes Balears, mentre que a la part S estan a menys de 8 m (Figura 2). Aquest és el resultat de l'efecte d'ombra que les Illes produeixen sobre les tempestes de component Nord.

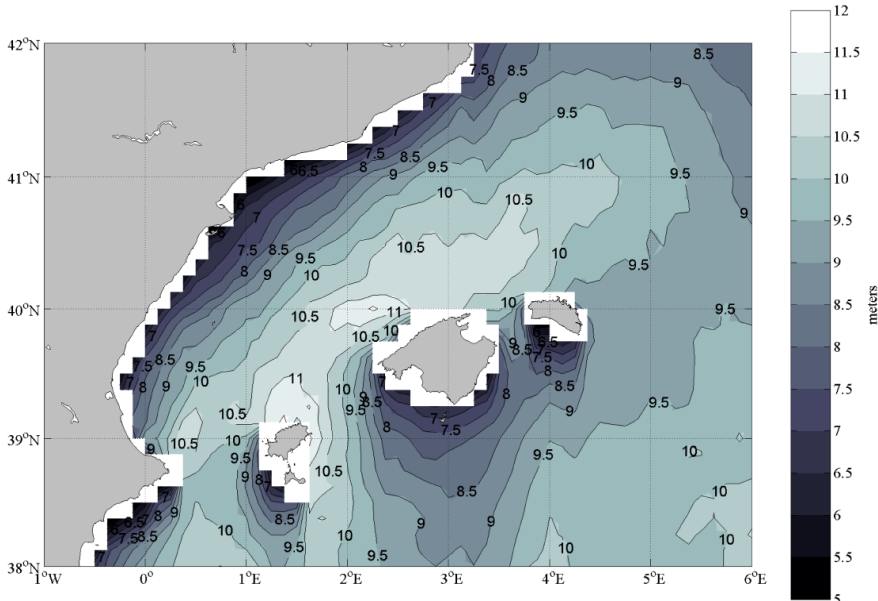


Fig. 2. Distribució espacial de l'alçada d'ona significativa dels darrers 50 anys de registre. Font: Cañelles (2010).

Fig. 2. Spatial distribution of the significant wave height of the last 50 years of registration. Source: Cañelles (2010).

Dipòsits de blocs sobre costes rocoses

Els sistemes de costa rocosa són sensibles als esdeveniments d'alta energia. Les acumulacions de blocs que, de vegades, es troben sobre els penya-segats representen un tipus de sediment amb característiques distintives del seu transport per tempestes de gran energia i per tsunamis (Cox *et al.*, 2018; Martín-Prieto *et al.*, 2018). Molts dipòsits de blocs poden tenir un origen poligènic associat tant a tempestes severes, com a tsunamis (Hall, 2011). No obstant, la distinció entre els blocs de tsunami i els dipòsits d'onatge es basa en un conjunt de criteris sedimentològics, morfològics, cronològics, estratigràfics i d'organització que els diferencia de la resta de dipòsits. Treballs recents indiquen que la mida dels blocs es pot utilitzar per estimar l'energia de les ones de tempesta i/o tsunamis necessàries per moure aquests blocs (Goto *et al.*, 2011).

Metodologia

Les eines d'ús comú en els estudis de blocs són: la caracterització, localització i cartografia de la seva distribució espacial, l'estimació de la mida dels blocs, del seu volum i del seu pes, mitjançant el mesurament dels seus eixos, la descripció de l'àmbit geoambiental de les àrees analitzades, i l'anàlisi del transport dels blocs mitjançant equacions matemàtiques per determinar els processos hidrodinàmics necessaris per l'arrabassament i el transport dels blocs.

La metodologia utilitzada en aquest estudi, ha consistit en la mesura i observació de diferents paràmetres a cadascuna de les àrees analitzades. S'han seguit les següents fases:

1.- Caracterització morfomètrica de blocs. De cada bloc s'han obtingut els valors d'eix llarg (A), d'eix intermedi (B) i de l'eix curt (C). Per tal de determinar un volum més acurat, s'han aplicat els resultats de comparar el volum resultant de la multiplicació dels tres eixos amb el volum resultat de la triangulació de blocs que ens proporciona un volum més aproximat al real. Per això, s'ha reduït un 38% el producte dels seus eixos, ajustant-se en major mesura, a la realitat del bloc (Roig-Munar *et al.*, 2015).

2.- De cada bloc, s'han obtingut la seva orientació i el seu cabussament, així com la seva cota i la distància a la línia de costa, prenent com a referència el centre del bloc.

3.- S'ha realitzat el càlcul de les densitats de 4 blocs ubicats a tres àrees d'estudi, d'acord amb les litologies presents a cada àrea.

4.- S'ha analitzat la disposició sedimentària dels blocs registrant la presència de blocs aïllats, grups de blocs imbricats, cordons de blocs imbricats i/o presència de blocs recentment arrabassats o marques d'impactes recents associades a tempestes. També s'han realitzat observacions respecte l'estratificació de la zona i la relació dels blocs amb l'àrea font, la presència de fractures que poden afavorir l'arrabassament dels blocs exposats i la presència de blocs amb incrustacions de fauna marina endolítica, que ens indiquen la situació del bloc abans del seu desplaçament.

5- També s'ha comprovat la presència de morfologies pre-deposicionals i post-deposicionals com *notch* i/o cocons, com indicadors de la posició inicial i final dels blocs, així com de les superfícies d'abració corresponents als blocs desmantellats.

6- Finalment, s'ha utilitzat la fórmula de Scheffers i Kelleter (2003) denominada

Transport Figure (TF): es tracta d'una equació simple que consisteix en la multiplicació del pes del bloc (P) en tones, per la distància on es troba des de la cornisa del penya-segat (D) en metres, i per l'altura del bloc sobre el nivell del mar (H) en metres. És una bona aproximació a l'energia necessària pel transport dels blocs; segons els seus creadors i en el cas de Mallorca, els valors superiors a 250 de *Transport Figure* (TF) es consideren blocs transportats per tsunamis (Scheffers i Kelletat, 2003).

$$TF = P \cdot D \cdot H$$

Aquesta fórmula simplifica les formulacions hidrodinàmiques, els llinars i les condicions per discernir l'ona de tempesta de l'ona de tsunami. Es tracta d'una aproximació a l'energia necessària pel transport de cada bloc. També ha estat utilitzat per Keating (2000) i Keating *et al.* (2011) en la comparació de diferents blocs al llarg de la costa del Marroc i Hawaii, i per Roig-Munar *et al.* (2014, 2015) en el estudi de blocs a les Illes Balears. La simplicitat de l'equació podria ser millorada amb diferents factors adaptats a cadascuna de les àrees de mostreig, donant una visió més global a les equacions aplicades de Nott (2003 a i b).

7.- Les morfologies càrstiques de dissolució post-deposicionals ubicades sobre blocs han estat utilitzades per a la datació del seu desplaçament. En efecte, la datació de les morfologies de cocons sobre blocs (Figura 3.7) és una eina de datació indirecta dels fenòmens que han donat lloc a la deposició d'aquests blocs arrabassats o traslladats del seu estat o posició originària (Roig-Munar *et al.*, 2014). En aquest cas, i en gran part degut a la manca de restes de fauna marina associada a blocs, s'ha optat per obrir una nova línia en l'estimació de l'edat, mitjançant el càlcul de les taxes de dissolució càrstica dels cocons post-deposicionals ubicats sobre els blocs.

Les dades de dissolució obtingudes per Gómez-Pujol (2006) presenten una graduació de les taxes d'erosió de mar a terra; per a la zona d'onatge les taxes varen ser de 0,30 mm/a, per a la zona d'esquitxos litorals de 0,68 mm/a, i finalment a la zona de ruixim les taxes es reduïren de 0,30 mm/a a 0,40 mm/a. Posteriorment, Balaguer *et al.* (2013) analitzaren les taxes de dissolució en un període de 10 anys sobre materials carbonatats exposats i en posició vertical, analitzant parets de canteres que feia 10 anys havien estat tallades i abandonades. Les taxes obtingudes varen ser de 0,23 mm/a en morfologies exposades a l'onatge i el vent, mentre que a espais protegits les taxes eren de 1,76 mm/a. Aquestes dades entren dins els rangs de les obtingudes a altres localitats balears extrems de les mesures de profunditats màximes en elements de patrimoni històric (Gómez-Pujol *et al.*, 2002) o mitjançant exposicions de pastilles carbonatades sobre les roques (Gómez-Pujol i Fornós, 2004). Als efectes de datacions dels cocons post-deposicionals, en aquest treball, s'ha considerat una mitjana de 0,3 mm/any, amb un marge d'error entre 0,2 i 0,4 mm/any.

Resultats

Al llarg de l'arxipèlag Balear (Fig. 3), s'han identificat i analitzat 57 àrees on es troben blocs de grans dimensions que permeten realitzar mesures morfomètriques per ser considerats potencialment com dipòsits de tsunamis. Analitzades per illes, destaca Menorca, amb 26 àrees; l'illa de Mallorca presenta 20 àrees d'estudi, mentre que Eivissa i

Formentera i els seus illots en tenen 7 i 4 respectivament. La majoria dels dipòsits se situen en les costes meridionals de les Illes i tan sols a Menorca i en menor nombre a Eivissa es troben blocs a les costes de Tramuntana. També cal esmentar que en diversos punts els blocs han estat utilitzats com elements de construcció i, per tant, resulten absents.

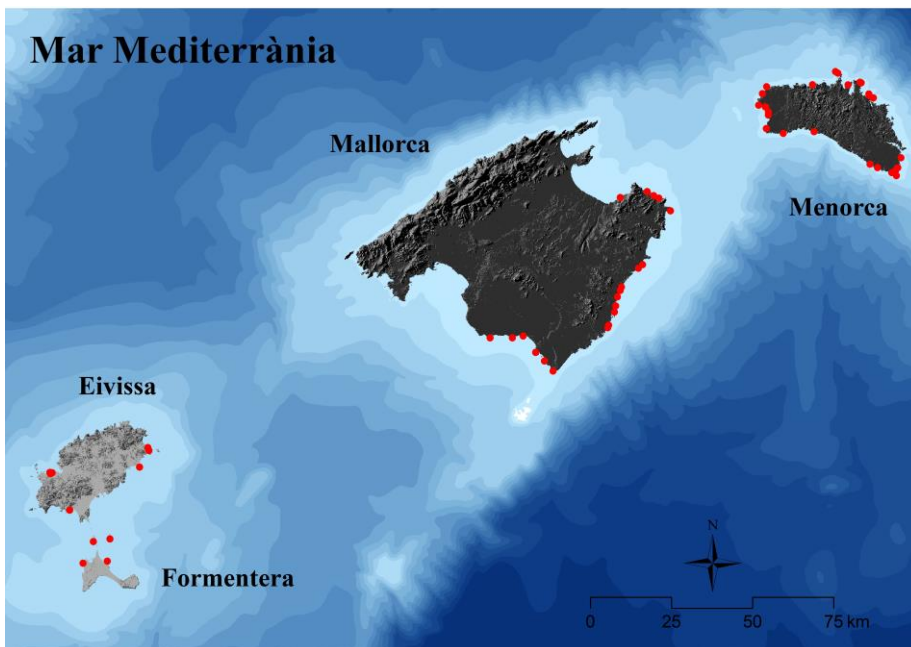


Fig. 3. Àrees d'estudi de blocs a les costes rocoses de les Illes Balears.

Fig. 3. *Boulders study areas on the rocky shores of the Balearic Islands.*

Menorca

Més de 3000 grans blocs s'han analitzat a les plataformes costaneres de Menorca, en 26 zones d'estudi seleccionades (Fig. 4 i Taula 1). El pes, l'alçada sobre el nivell del mar i la distància del límit del penya-segat indiquen que han estat desallotjats i posicionats per l'acció de les onades de tsunami, tot i que alguns d'aquests blocs també han estat retreballats per onades de tempesta.

Els models de simulació han confirmat l'alta probabilitat d'impacte de les onades de tsunami al llarg de la costa de Menorca. L'últim episodi, a l'any 2003, va causar una gran quantitat de danys materials en alguns ports de l'illa. Tot i que la ubicació dels blocs és molt important, es pot obtenir també informació de les orientacions dels blocs i de la presència de blocs imbricats amb cordons i/o grups aïllats que evidencien l'efecte d'un flux continu que només pot originar-se amb un tsunami. La distància mitjana dels blocs als escarpaments es de 37.5 m, el que permet excloure, a la majoria dels blocs analitzats, orígens per qualsevol altre fenomen. Les equacions hidrodinàmiques aplicades a aquests blocs donen valors d'ones molt lluny de l'abast de les onades de tempesta registrades en els darrers 50 anys, una indicació clara que una ona de tsunami hauria de ser la causa del seu

arrabassament i transport terra endins. Blocs de fins a 228 T (Illa de l'Aire), alçades que arriben als 31m s.n.m. (Punta Nati), i distàncies des de la vora del penya-segat de fins a 136m (Illa de l'Aire) confirmen els resultats obtinguts als càlculs aplicats. El valor màxim del Transport Figure arriba a superar els 80.000 amb un promig dels valors màxims de 11.135, bastant més modest.

La majoria de dipòsits es localitzen majoritàriament a la costa sud-oriental i occidental de l'illa i els models numèrics han identificat aquestes costes com unes zones amb una alta probabilitat d'impacte de tsunamis (Fig. 4).

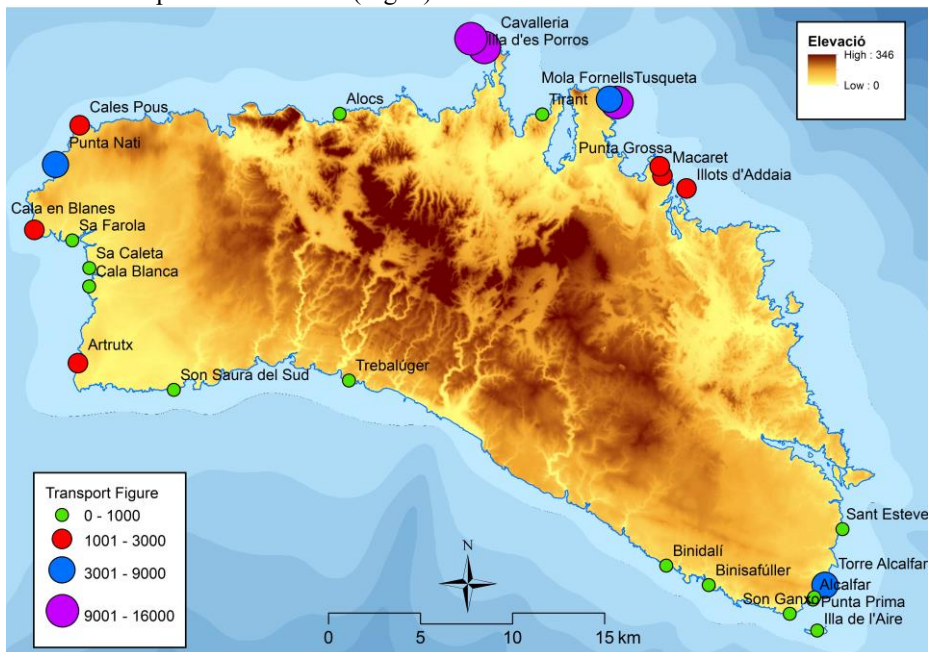


Fig. 4. Ubicació de les àrees mostrejades a Menorca amb representació del TF mitjà cada àrea.
Fig. 4. Location of the sampled areas in Menorca with representation of the average Transport Figure for each area.

Tot i que algunes ones de tempesta poden tenir un paper important en l'emplaçament d'alguns blocs, la seva distribució al llarg de Menorca, el grau d'imbricació, la orientació i l'energia necessària per a la seva col·locació confirmen el seu transport per tsunamis que procedents del nord d'Àfrica arriben a la costa de Menorca.

Les dades històriques sobre les onades de tempesta (màxim registrat el 21 de gener de 2020 amb 14,8 m), o fins i tot els medicane (11 m de màxima), no poden explicar la mida, l'orientació, la imbricació i la posició dels blocs. La datació de diferents blocs mitjançant C^{14} , i les dades obtingudes a partir de les taxes de dissolució de cocons sobre calcàries, estableixen un rang d'edat d'emplaçament per tsunami de les roques estudiades entre els segles XVII i XIX (Fig. 6). Durant aquest període, set terratrèmols amb intensitats superiors 6,5 han estat documentats al llarg de la costa N d'Algèria, i 11 registres històrics de tsunami han estat descrits per registres a les Illes Balears.

Taula 1. Valors mitjans i màxims de les arees analitzades a Menorca (H p-s: altura penya-segat, H mx: altura màxima ona, Dir ones: direcció onatge, Dir blocs: orientació blocs, Hmx bloc: altura màxima bloc, Dist. mx bloc: distància màxima del bloc respecte el penya-segat, Dist. md: distància mitjana del bloc respecte el penya-segat, H md: altura mitjana del bloc, TF md i mx: Transport Figure mitjà i màxim, Pes md i mx: pes mitjà i màxim del bloc).

Table 1. Mean and maximum values of the areas analyzed in Menorca (H p-s: cliff height, H mx: maximum wave height, Dir ones: wave direction, Dir blocs: boulder orientation, Hmx bloc: maximum block height, Dist. màx bloc: maximum distance from the boulder to the cliff edge, Dist. md: average distance from the boulder to the cliff edge, H md: average height of the boulder, TF md and mx: average and maximum of Transport Figure, Pes md and mx: average and maximum boulder weight).

| Ubicació | H p-s | H mx | Dir. Ones | Dir. blocs | Hmx bloc | Dist. màx. bloc | Dist. md | H md | TF md | TF mx | Pes md | Pes max |
|-------------------|-------|------|-----------|------------|----------|-----------------|----------|------|--------|--------|--------|---------|
| Sant Esteve | 0,5 | 7,5 | 360 | 086 | 4 | 35 | 24 | 2 | 456 | 2.710 | 9 | 119,8 |
| Torre Alcafar | 5,5 | 7,5 | 360 | 117 | 10 | 41 | 36 | 9 | 5.665 | 22.086 | 21 | 106 |
| Alcafar | 4,5 | 7 | 360 | 127 | 11 | 49 | 33 | 6 | 565 | 3.316 | 3 | 35,2 |
| Punta Prima | 1,5 | 7 | 225 | 097 | 5 | 10 | 6 | 3 | 30 | 221 | 2 | 5,75 |
| Illa de l'Aire | 10 | 8,5 | 225 | 123 | 10 | 136 | 51 | 6 | 995 | 26.313 | 5 | 228,7 |
| Son Ganxo | 1,2 | 7 | 225 | 184 | 4 | 36 | 22 | 3 | 332 | 1.224 | 5 | 13,1 |
| Binisafüller | 1 | 6,5 | 247 | 152 | 4 | 50 | 24 | 2 | 152 | 677 | 3 | 15,4 |
| Binidali | 10 | 7,5 | 247 | 177 | 19 | 58 | 27 | 17 | 336 | 3.202 | 1 | 30,1 |
| Trebalúger | 5 | 8,5 | 320 | 203 | 9 | 50 | 42 | 8,1 | 916 | 1.577 | 2,7 | 4,5 |
| Son Saura del Sud | 4,5 | 8,5 | 315 | 253 | 8 | 25 | 11,6 | 7,6 | 444 | 2.136 | 3,3 | 21,9 |
| Artrutx | 8 | 7 | 315 | 314 | 11 | 65 | 47 | 10 | 1.207 | 6.126 | 3 | 16,8 |
| Cala Blanca | 5 | 7 | 315 | 274 | 9 | 24 | 15 | 8 | 240 | 2.333 | 2 | 20,3 |
| Sa Caleta | 5 | 8 | 315 | 293 | 10 | 45 | 20 | 9 | 362 | 1.938 | 2 | 8,2 |
| Sa Farola | 5,5 | 8 | 360 | 112 | 10 | 19 | 11 | 9 | 426 | 2.584 | 4 | 15,6 |
| Cala en Blanes | 15 | 10 | 360 | 061 | 18 | 55 | 30 | 18 | 2.372 | 6.087 | 6 | 8 |
| Punta Nati | 21 | 10 | 360 | 174 | 31 | 46 | 28 | 25 | 3.163 | 12.452 | 5 | 12,9 |
| Cales Pous | 20 | 10 | 360 | 078 | 26 | 47 | 39 | 24 | 2.226 | 9.428 | 2 | 15,7 |
| Alocs | 1,5 | 9,5 | 360 | 164 | 7 | 25,5 | 22 | 5,5 | 165 | 749 | 1,8 | 3,5 |
| Illa d'es Porros | 7 | 10 | 360 | 045 | 15 | 82 | 56,8 | 9,5 | 10.709 | 84.696 | 19,8 | 128,3 |
| Cavalleria | 5,5 | 10 | 360 | 169 | 13 | 111 | 87 | 11 | 10.888 | 34.154 | 10 | 23,9 |
| Tirant | 0,5 | 9,5 | 360 | 057 | 7 | 30 | 27 | 6 | 151 | 922 | 1 | 4,4 |
| Mola Fornells | 20 | 9,5 | 360 | 093 | 27 | 89 | 69 | 23 | 5.655 | 11.008 | 3 | 5,8 |
| Tusqueta | 2 | 9,5 | 360 | 086 | 20 | 129 | 109 | 15 | 15.178 | 36.862 | 9 | 16,8 |
| Punta Grossa | 8,5 | 9,5 | 360 | 122 | 13 | 30 | 23 | 13 | 2.096 | 6.436 | 7 | 21,5 |
| Macaret | 9,5 | 9,5 | 360 | 089 | 13 | 71 | 57 | 12 | 2.718 | 5.372 | 4 | 7,7 |
| Illots d'Addaia | 9,5 | 9,5 | 360 | - | 6 | 90 | 47 | 4 | 1.303 | 4.914 | 6 | 15,6 |
| Promig | 7 | 9 | | | 12 | 56 | 37 | 10 | 2.644 | 11.135 | 5 | 35 |





Fig. 5. *Penya-segats de Punta Nati (A) i Alcafar (B). Blocs a l'Illa de l'Aire (C) i Binidali (D).
Fig. 5. Punta Nati (A) and Alcafar Cliffs (B). Boulders of the Illa de l'Aire (C) and Binidali (D).*

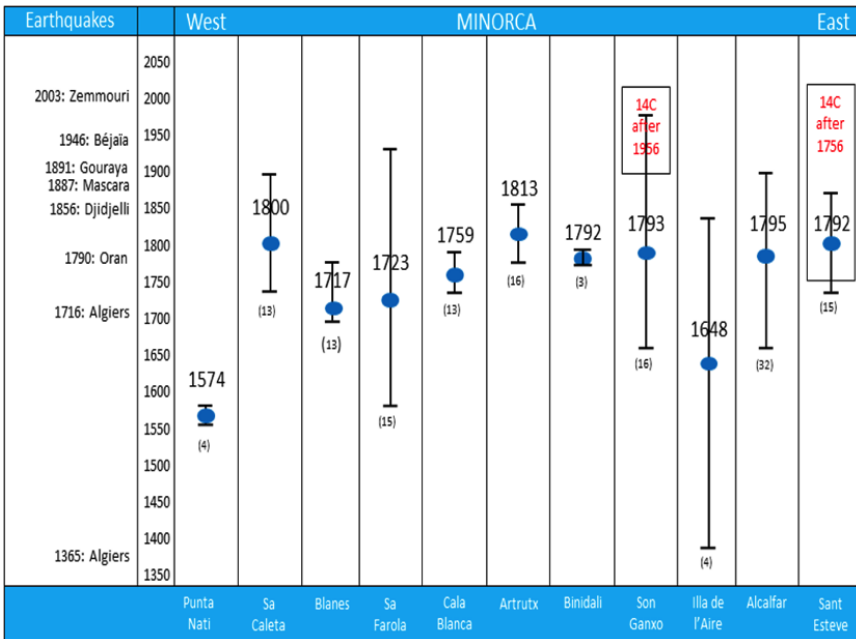


Fig. 6. *Cronologia del emplaçament dels blocs de Menorca en base a cocons post-deposicionals. Els punts blaus indiquen la edat mitjana de cada localitat. La barra mostra la dispersió de les edats calculades i el nombre en parèntesi mostra el número de mesures. La columna de l'esquerra mostra els terratrèmols ocorreguts amb intensitat >X (Escala de Mercalli) al nord d'Algèria des de 1365. Els rectangles indiquen l'edat obtinguda per mitjà de C¹⁴. (Font: Roig-Munar et al., 2018).
Fig. 6. Chronology of the location of the boulders of Menorca based on post-depositional basin pools. Blue dots indicate the average age for each locality. The bar shows the dispersion of the calculated ages and the number in parentheses shows the number of measurements. The left column shows the earthquakes with an intensity > X (Mercalli Scale) in northern Algeria since 1365. The rectangles indicate the age obtained by C¹⁴. (Source: Roig-Munar et al., 2018).*

Mallorca

S'han analitzat 20 àrees amb grans blocs depositats en penya-segats de la costa de Mallorca (Fig. 7 i Taula 2). Majoritàriament es troben a la part superior d'una plataforma tabular del Miocè Superior. Están a diverses desenes de metres de la vora del cingle, fins a 18 m sobre el nivell de la mar, presenten pesos fins a 46 T i la seva posició descarta processos provinents de terra o erosions diferencials. Es troben a les costes E i S de Mallorca, on l'altura i l'energia de les onades són baixes en comparació amb les del N i NE. Algunes dels cordons de blocs es troben a alçades molt per sobre de l'alçada màxima de l'onada. Al Caló den Serral (Fig. 8 A), els còdols es troben a la part superior d'un penya-segat de 15 m s.n.m. on les onades màximes son de 11 m i que a més, presenta una gran cavitat (cova del Pilar) a la seva base. El valor de Transport Figure d'aquest punt arriba a superar els 20.000.

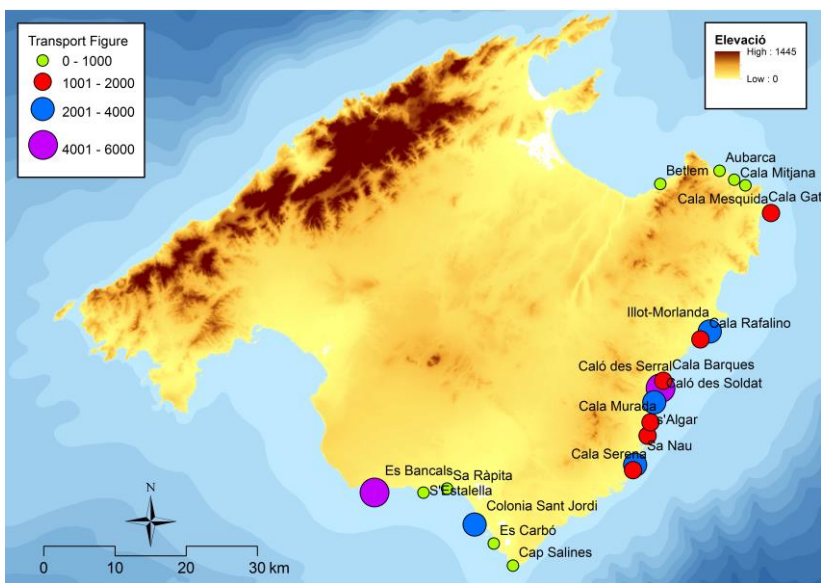


Fig. 7. Ubicació de les àrees mostrejades a Mallorca amb representació del TF mitjà cada àrea.

Fig. 7. Location of the sampled areas in Majorca with representation of the average Transport Figure for each area.

La pràctica totalitat dels blocs es troben en ubicacions on els models numèrics de simulació de tsunami procedents de la costa nord-africana preveuen l'impacte d'un tsunami a Mallorca (Fig. 1). Fonts documentals també confirmen un tsunami molt gran que va afectar la costa SE de Mallorca el 1756, amb una entrada de la mar de fins a 2 km terra endins i un *run-up* de fins a 45 m (Fontseré, 1918). Segons les dades del radiocarboni i la taxa d'erosió dels cocons de dissolució, les edats dels blocs de les localitats estudiades oscil·len entre el 1591 i el 1894, tot i que la majoria es concentren cap a l'any 1790, coetani amb les fonts històriques (Fig. 10). Algunes de les edats convencionals de radiocarboni són coherents amb aquestes dades (edats de Cap Salines de Kelletat *et al.*, 2005) i les d'aquest

estudi, però d'altres (edats de Scheffers *et al.*, 2008), al NE de Mallorca i les dades en s'Estalella no ho són; per tant, és probable que un tsunami més antic es produís al voltant del 500 dC i els nous events retraballessin els antics blocs.

| Ubicació | H p-s | H mx | Dir. Ones | Dir. blocs | Hmx bloc | Dist. màx. bloc | Dist. md | H md | TF md | TF mx | Pes md | Pes max |
|--------------------|-------|------|-----------|------------|----------|-----------------|----------|------|-------|--------|--------|---------|
| Betlem | 1 | 7 | 360 | 318 | 1,5 | 14 | 12 | 1,4 | 188 | 103 | 4,1 | 4,92 |
| Aubarca | 4,5 | 7 | 360 | 051 | 6 | 32 | 15,5 | 9,6 | 821 | 1.303 | 11,8 | 18,1 |
| Cala Mitjana | 1,5 | 7 | 360 | 033 | 10 | 56 | 22,3 | 5,6 | 898 | 1.996 | 7,6 | 11,2 |
| Cala Mesquida | 1,5 | 7 | 360 | 144 | 8,5 | 38 | 22,1 | 6 | 639 | 1.517 | 5,7 | 16,5 |
| Cala Gat | 9,5 | 7 | 360 | 045 | 15 | 42 | 24 | 11,6 | 1.200 | 1.680 | 4,9 | 8 |
| Cala Rafalino | 5 | 7,5 | 090 | 141 | 12 | 60 | 30,9 | 8 | 1.991 | 8.164 | 8,5 | 36,8 |
| Illot-Morlanda | 8 | 7,5 | 090 | 135 | 13 | 50 | 22,9 | 9,4 | 2.013 | 7.786 | 8,7 | 31,6 |
| Cala Barques | 3,5 | 7,5 | 090 | 116 | 10 | 71 | 32 | 8,8 | 1.666 | 8.129 | 6,8 | 43,0 |
| Caló des Serral | 10 | 7,5 | 090 | 130 | 15 | 66 | 36,8 | 12,6 | 4.319 | 20.492 | 9,3 | 26,4 |
| Caló des Soldat | 5 | 7,5 | 090 | 132 | 12,5 | 48 | 40 | 10 | 2.089 | 3.816 | 5,03 | 7,4 |
| Cala Murada | 4,5 | 7 | 090 | 098 | 12 | 40 | 19,4 | 9,8 | 1.441 | 2.238 | 7,6 | 15,8 |
| s'Algar | 13 | 7,5 | 090 | 137 | 17 | 54 | 29,1 | 11,5 | 1.832 | 5.514 | 7,5 | 46,5 |
| Sa Nau | 9 | 7,5 | 090 | 151 | 15 | 41 | 27,5 | 13 | 2.689 | 8.653 | 8,3 | 18,0 |
| Cala Serena | 10 | 7,5 | 090 | | 18 | 24 | 19,7 | 15,8 | 1.241 | 2.573 | 3,6 | 6,0 |
| Cap Salines | 0,5 | 6,5 | 225 | 174 | 2,5 | 30 | 9 | 2 | 65 | 160 | 4,5 | 10,4 |
| Es Carbó | 0,5 | 6,5 | 225 | 216 | 4 | 51 | 19,8 | 2,8 | 557 | 2.648 | 9,9 | 33,9 |
| Colonia Sant Jordi | 1,5 | 6,5 | 203 | 223 | 4,5 | 87 | 28,2 | 3,4 | 2.027 | 7.469 | 15,1 | 26,8 |
| Sa Ràpita | 0,5 | 6,5 | 225 | 165 | 4,5 | 8 | 8,5 | 3,8 | 249 | 258 | 8 | 9,6 |
| S'Estalella | 7,5 | 6,5 | 225 | 180 | 8,5 | 55 | 27,8 | 5,8 | 901 | 4.905 | 6,5 | 23,5 |
| Es Bancals | 10 | 6,5 | 225 | 184 | 25 | 80 | 52 | 17 | 5.483 | 12.004 | 7,02 | 12,9 |
| Promig | 5 | 7 | | | 11 | 47 | 25 | 8 | 1.615 | 5.070 | 8 | 20 |

Taula 2. Valors mitjans de cada àrea d'estudi (H p-s: altura penya-segat, H mx: altura màxima ona, Dir ones: direcció onatge, Dir blocs: orientació blocs, H mx bloc: altura màxima bloc, Dist. mx bloc: distància màxima del bloc respecte del penya-segat, Dist. md: distància mitjana del bloc respecte el penya-segat, H md: altura mitjana del bloc, TF md i mx: Transport Figure mitjà i màxim, Pes md i mx: pes mitjà i màxim del bloc).

Table 2. Mean values of each Majorca study area (H p-s: cliff height, H mx: maximum wave height, Dir ones: wave direction, Dir blocs: boulder orientation, Hmx bloc: maximum block height, Dist. màx bloc: maximum distance from the boulder to the cliff edge, Dist. md: average distance from the boulder to the cliff edge, H md: average height of the boulder, TF md and mx: average and maximum of Transport Figure, Pes md and mx : average and maximum boulder weight).

Malgrat les incerteses en la datació exacta d'esdeveniments de tsunami del passat i en les dates dels cocons de dissolució, el que sí obtenim son ordres de magnitud prou coherents, fins i tot amb fonts d'informació molt diferents. Tot i que algunes onades de tempesta poden tenir un paper important en la distribució dels blocs a les localitzacions mes baixes (S'Estalella, Fig. 9, i Cap de ses Salines), la distribució dels blocs al llarg de l'illa, el grau i la direcció de la imbricació i l'energia (en forma d'alçada d'ona) necessària pel seu arrabassament, transport i sedimentació, evidencien l'impacte dels tsunamis provinents del Nord d'Àfrica que arriben a la costa de Mallorca.

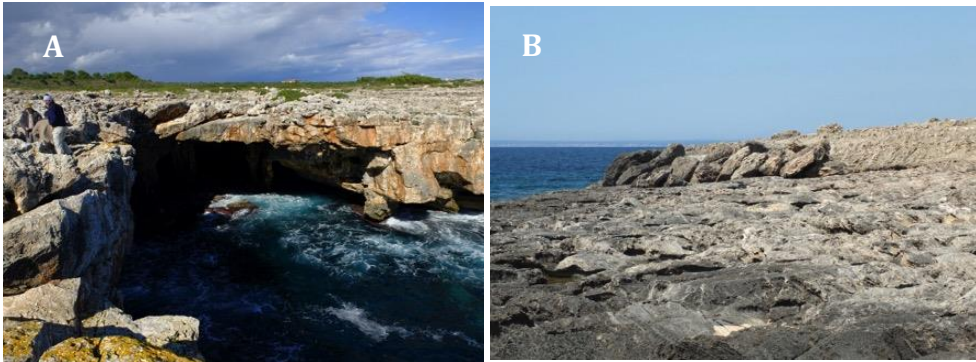


Fig. 8. Blocs de tsunami a damunt de la cova del Pilar, al sud del Calò des Serral (A) i blocs imbricats a n'es Carbó (B).

Fig. 8. *Tsunami boulders above the Pilar cave, south of Calò des Serral (A) and imbricated boulders in es Carbó (B).*

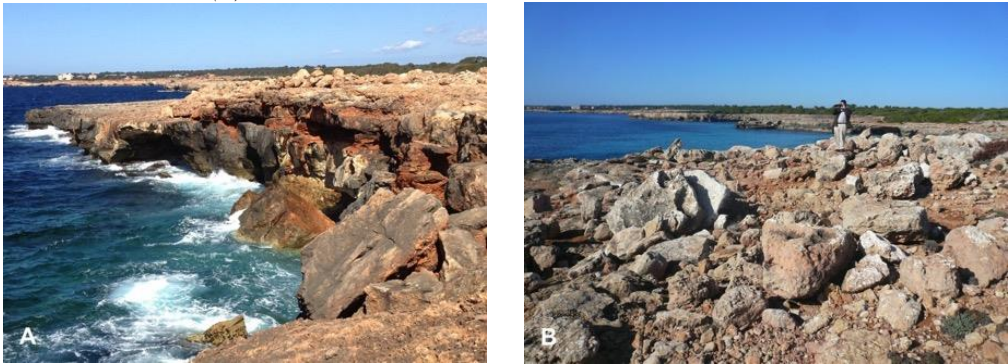


Fig. 9. Exemples de blocs imbricats a s'Estalella.

Fig. 9. *Examples of imbricated boulders in S'Estalella.*

| Main Earthquakes | SW | MAJORCA | | | NE | | | |
|------------------|------|-----------|----------|-------------|--------------|------------------|--------------------|-------------|
| 2050 | | | | | | | | |
| 2003: Zemmouri | 2000 | | | | | | | |
| 1945: Bejaia | 1950 | | | | | | | |
| 1891: Gouraya, | 1900 | 1864 | 1894 | 1950 | | | | |
| 1856: Djidellii | 1850 | 1795 | 1793 (2) | 1826 | 1869 | | | |
| 1790: Oran | 1800 | | | | 1800 | | | |
| 1755: Lisboa | 1750 | | | | 1864 | | | |
| 1716: Algiers | 1700 | | | | 1779 | | | |
| 1660: Majorca | 1650 | 1661 | | | 1876 | | | |
| | 1600 | | | | 1793 | | | |
| | 1550 | | | | 1661 | | | |
| | 1500 | | | | 1616 | | | |
| | 1450 | | 1508 (1) | | 1626 | | | |
| | 1400 | | | | | | | |
| 1365: Algiers | 1350 | | | | | | | |
| | 1300 | 542 (2) | | | 565 (1) | | | |
| | 1250 | 438 | | | | | | |
| | 1200 | | | | | | | |
| | 1150 | | | | | | | |
| | | Estalella | Es Carbó | Cap Salines | Cala Barques | Caló d'en Serral | Caló d'en Rafelino | NE Mallorca |

Eivissa i Formentera

S'han analitzat set afloraments de blocs a l'illa d'Eivissa, dos més a l'illa de Formentera i un a S'Espalmador i un altre a S'Espardell (Fig. 11 i Taula 3). La disposició dels blocs de fins a 57 T, alguns a 14 m s.n.m., a més de 100 m de la vora del penya-segat i molt lluny de qualsevol font d'origen gravitatori, apunten a un desplaçament terra endins per tsunamis i/o tempestes. Els blocs es troben als llocs on els models numèrics de simulació de tsunami procedents de terratrèmols a la costa nord-africana preveuen l'impacte del tsunami en aquestes Illes (Fig. 1). Segons les datacions amb radiocarboni i amb la taxa de creixement de les morfologies de dissolució post-transport, l'edat dels blocs oscil·la entre els anys 1750 i 1870.

La litologia i les fàcies dels blocs coincideixen amb les que es troben als nivells superiors dels penya-segats, d'aquesta manera es pot inferir que la majoria dels blocs han estat arrabassats i transportats terra endins des de la vora del penya-segat. Són pocs els blocs que presenten fauna incrustat, es a dir, que provenen de zones submergides i només un d'ells s'ha utilitzat per la datació per C^{14} .

Malgrat que l'altura de l'ona de tempesta i, per tant l'energia, és més elevada a les costes de Tramuntana, els grans blocs es troben a les parts meridionals de les Balears, com es també el cas de les Pitiüses. El règim d'ones d'Eivissa i Formentera es caracteritza per vents tant de component nord com sud, un fetch de 500 km del SW i 900 km de l'ESS. Les altituds d'ona arriben fins als 11 m (Hs50).

Els blocs de cinc dels afloraments (Punta Pedrera, Pou des Lleó i Punta Arabí a Eivissa i Punta Prima i Punta Gavina a Formentera, Fig. 12) estan situats a 12 m s.n.m. de mitjana, a distàncies entre 25 i 115 (Taula 3) m del penya-segat i tenen pesos entre 1.4 i 11.5 T. Els resultats de les equacions hidrodinàmiques requereixen alçades de les onades de tempesta de fins a 20 m per arrabassar els blocs submergits i al voltant de 13 m per desplaçar els blocs subaeris. L'aplicació de l'equació de *Transport Figure* confirma una interpretació de l'origen d'aquests blocs per tsunami; valors de TF promig de 8.000 ratifiquen el requeriment d'un flux de tsunami per iniciar i transferir aquests blocs a la seva posició actual i encara més per a la seva imbricació.

Dos afloraments d'Eivissa (Sant Antoni i Punta Verda) mostren blocs situats entre 2 i 3 m s.n.m. i entre 25 i 30 m cap a l'interior de la costa. Tot i que els seus pesos de mitjana són de 17,6 i 14,5 T, respectivament, les onades de tempestes podrien assolir la seva posició. No obstant això, l'origen tsunamític de la resta d'afloraments obliga a considerar un origen mixte per a aquests jaciments. La distribució dels emplaçaments dels blocs al llarg de les Pitiüses, la seva orientació i imbricació evidencien que van ser transportats per les onades de tsunamis que procedent del nord d'Àfrica van arribar a les costes de Eivissa i Formentera.

←(veure pàgina anterior) **Fig. 10.** Terratrèmols històrics (Escala de Mercalli >X) i datació de blocs de diferents emplaçaments a Mallorca. Els rectangles blancs es corresponen amb edats de cocons post-deposicionals. Els rectangles grisos corresponen a dades de radiocarboni de (1) Kelletat *et al.* (2005) i (2) de Scheffers *et al.* (2008). Font: Roig-Munar *et al.* (2019).

Fig. 10. Historic earthquakes (Mercalli scale >X) and boulder dating from different locations in Mallorca. White rectangles correspond to post-depositional basin pools. The gray rectangles correspond to radiocarbon data from (1) Kelletat *et al.* (2005) and (2) from Scheffers *et al.* (2008). Source: Roig-Munar *et al.* (2019).

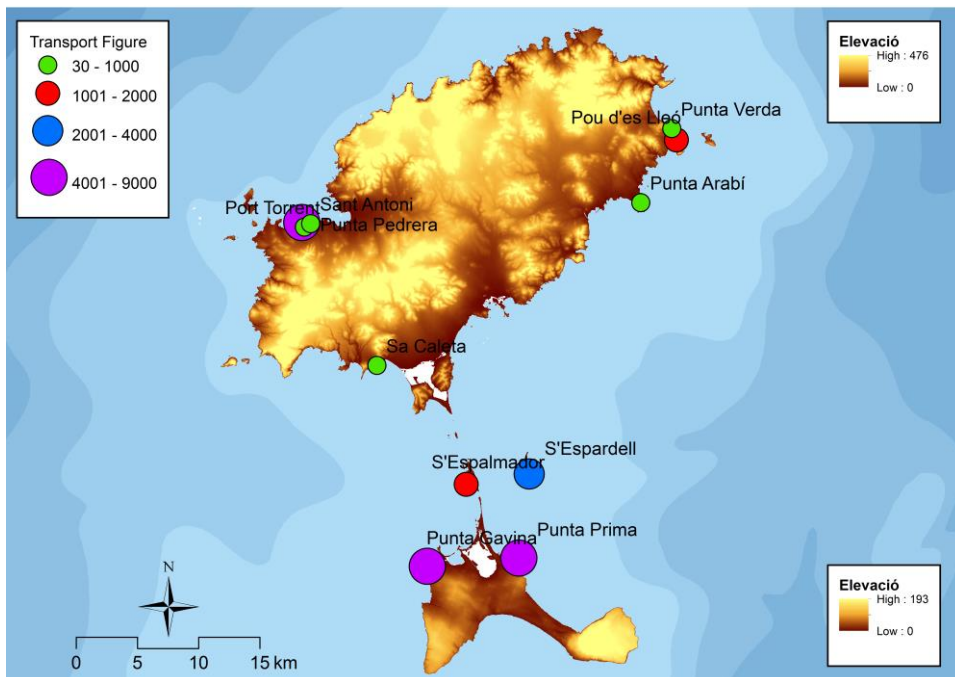


Fig. 11. Ubicació de les àrees mostrejades a les Illes Pitiüses amb representació del TF mitjà a cada àrea.

Fig. 11. Location of the sampled areas in the Pitiüses Islands (Ibiza, Formentera and nearby islets) with representation of the average Transport Figure in each area.

| Ubicació | H p-s | H mx | Dir. Ones | Dir. blocs | Hmx bloc | Dist. màx. bloc | Dist. md | H md | TF md | TF mx | Pes md | Pes max |
|---------------|-------|------|-----------|------------|----------|-----------------|----------|-------|-------|--------|--------|---------|
| Punta Verda | 2,5 | 9 | 023 | 099 | 3,5 | 25 | 19 | 2,8 | 121 | 842 | 2 | 10,3 |
| Pou d'es Lleó | 5,5 | 11 | 023 | 133 | 10 | 46 | 31 | 9 | 1.384 | 12.249 | 4,1 | 38,0 |
| Punta Arabí | 5,5 | 9,5 | 045 | 155 | 9,5 | 35 | 35 | 9,5 | 476 | 2.419 | 1,4 | 7,3 |
| S'Espardell | 7 | 8,5 | 045 | 162 | 7,5 | 56 | 34 | 5,8 | 2.127 | 6.599 | 9,5 | 22,6 |
| Punta Prima | 9,5 | 8,5 | 045 | 129 | 13 | 115 | 81,9 | 11,7 | 8.079 | 30.725 | 8,5 | 31,9 |
| Punta Gavina | 10 | 8,5 | 050 | 246 | 14 | 65 | 59 | 11,26 | 7.097 | 19.231 | 10,8 | 28,2 |
| S'Espalmador | 3,5 | 8,5 | 045 | 171 | 12 | 30 | 22 | 5,74 | 1.158 | 2.262 | 11,5 | 39,5 |
| Sa Caleta | 1,5 | 8,5 | 023 | 034 | 9,0 | 25 | 20 | 7,5 | 437 | 753 | 2,7 | 9,5 |
| Port Torrent | 0,5 | 8,5 | 023 | 100 | 2,5 | 40 | 37,1 | 2,27 | 260 | 386 | 3,03 | 4,17 |
| Sant Antoni | 0,5 | 8,5 | 023 | 020 | 2,1 | 30,5 | 12,1 | 1,4 | 199 | 1.126 | 11,1 | 32,5 |
| Punta Pedrera | 9 | 8,5 | 023 | 161 | 17 | 88 | 75,6 | 16,5 | 5.319 | 20.040 | 10,2 | 57,6 |
| Promig | 5 | 9 | | | 9 | 51 | 39 | 8 | 2.423 | 8.785 | 7 | 26 |

Taula 3. Valors mitjans de cada àrea d'estudi (H p-s: altura penya-segat, H mx: altura màxima ona, Dir ones: direcció onatge, Dir blocs: orientació blocs, H mx bloc: altura màxima bloc, Dist. Mx bloc: distància màxima del bloc respecte del penya-segat, Dist. Md: distància mitjana del bloc respecte del penya-segat, H md: altura mitjana del bloc, TF md i mx: Transport Figure mitjà i màxim, Pes md i mx: pes mitjà i màxim del bloc).

Table 3. Mean values of each study area in the Pitiüses (H p-s: cliff height, H mx: maximum wave height, Dir ones: wave direction, Dir blocs: boulder orientation, Hmx bloc: maximum block height, Dist. màx bloc: maximum distance from the boulder to the cliff edge, Dist. md: average distance from the boulder to the cliff edge, H md: average height of the boulder, TF md and mx: average and maximum of Transport Figure, Pes md and mx: average and maximum boulder weight).

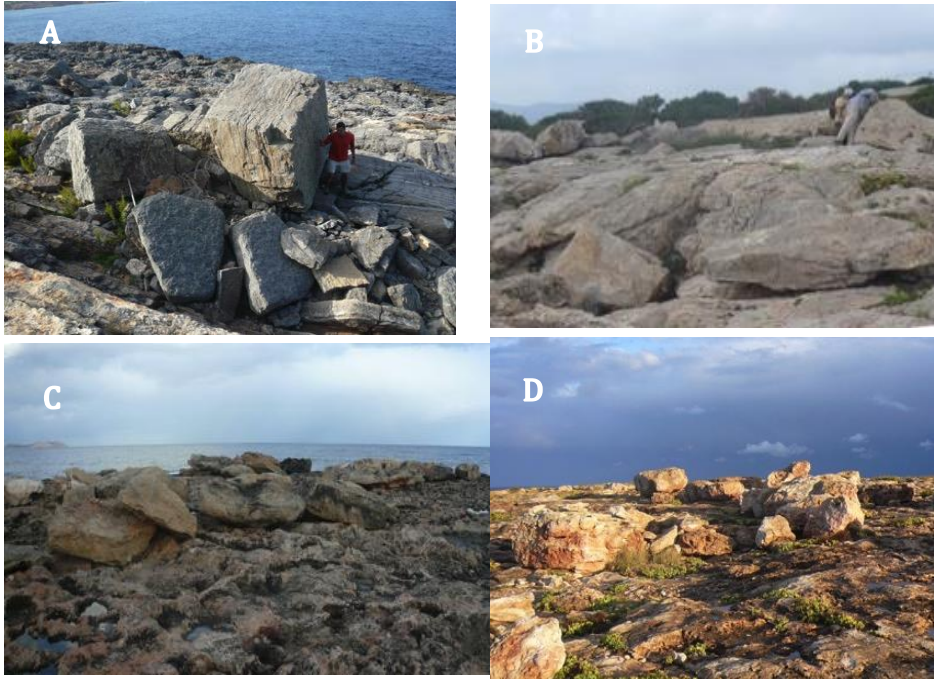


Fig. 12. Blocs als penya-segats de Punta Verda i Punta Arabí (A i B). Blocs a Sant Antoni i Punta Prima a Formentera (C i D).

Fig. 12. Boulders on the cliffs of Punta Verda and Punta Arabí (A and B). Boulders in Sant Antoni and Punta Prima in Formentera (C and D).

Conclusions

Els blocs ubicats sobre penya-segats litorals a les Illes Balears poden tenir dos orígens: tempesta i/o tsunami. La seva disposició descarta qualsevol origen per processos gravitacionals. Gran part dels blocs analitzats es troben a altures molt per sobre de l'alçada màxima de l'ona de tempesta que no arriba als 11 m a la majoria dels llocs estudiats. Molts blocs es troben a distància superiors als 70 m del penya-segat, alguns dins vegetació arbòria, i les masses d'aquests blocs són superiors a 10 T. El valor del *Transport Figure* de molts d'aquests blocs és superior a 5.000. A més, els blocs provenen del mateix nivell de la coronació del penya-segat i les seves ubicacions son coherents amb els models numèrics de la generació de tsunamis a partir de terratrèmols situats al nord d'Àfrica. Les edats d'acumulació dels blocs a partir de formes de dissolució post-deposicional, suggereixen que el transport va ocórrer entre el anys 1591 i 1894, amb edats mitjanes al voltant de 1800. Algunes de les edats convencionals de radiocarboni són consistents amb aquestes dades (per Cap Salines de Kelletat *et al.* (2005) i les nostres), però d'altres (edats de Scheffers *et al.*, 2008), NE de Mallorca i les nostres a s'Estalella, no ho són; per tant, és probable que un tsunami major possiblement va tenir lloc al voltant de l'any 500, i que va ser obliterat pels

events mes recents. Les fonts històriques disponibles (entre d'altres Fontseré, 1918) son congruents amb les dades analitzades i amb el seu origen tsunamític.

Agraïments

El present article inclou una síntesis de la tesi doctoral d'un dels autor, Francesc Xavier Roig i Munar amb el títol 'Blocs de tempesta i tsunami a les costes rocoses de les Illes Balears. Anàlisi geomorfològica i morfomètrica'.

Referències citades

- Alasset, J. P., Hebert, H., Maouche, S., Calbini, V. i 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., 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.
- Álvarez-Gómez, J.A., Aniel-Quiroga, I., González, M. i Otero, L. 2011. Tsunami hazard at the Western Mediterranean Spanish coast from seismic sources. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11: 227-240.
- Balaguer, P., Gómez-Pujol, Ll., Fuster, M. i Fornós, J. J. 2013. Alteración alveolar en areniscas carbonatadas y tasa de erosión asociada: 10 años de observaciones en las canteras litorales de es Carnatge (Mallorca, Islas Baleares). *Revista GeoTemas*, vol 14: 79-82.
- Bartel, P. i Kelletat, D. 2003. Erster Nachweis holozäner Tsunamis im Westlichen Mittelmeergebiet (Mallorca, Spanien) mit einem Vergleich von Tsunami und Sturmwellenwirkung auf Festgesteinsküsten. *Ber. Forsch. Technol.-Center Kiel Buüsum* 28, 93-107.
- 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.
- Cañelles, B., Orfila, A., Méndez, F. J., Menéndez, M. i 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.
- Corrales, O. 2015. Geomorfologia submarina de la plataforma continental davant del cap de Ses Salines, Mallorca. Memòria del Treball de Final de Grau, Facultat de Geologia Universitat de Barcelona, 35 pp. Inèdit
- Cox, R., Jahn, K. L., Watkins, O. G., and Cox, P.: Extraordinary boulder transport by storm waves (west of Ireland, winter 2013–2014) and criteria for analysing coastal boulder deposits, *Earth-Sci. Rev.*, 177, 623–636, 2018.
- Cuerda, J., Vicens, D. i Gràcia, F. 1991. Malacofauna y estratigrafía del Pleistoceno Superior marino de Son Real (Santa Margalida, Mallorca). *Bolletí de la Societat d'Història Natural de les Balears*, 34: 99-108.
- Femenies, J., 2007. Els grans blocs de Cap de Salines (Mallorca): Estudi sedimentològic i dinàmic. Treball Final de Carrera. Facultat de Geologia. Universitat de Barcelona. 39 pp. Inèdit
- Fontseré, E. 1918. Notas sueltas de sismología Balear. Publicaciones de la Sección de Ciencias Naturales, Facultat de Ciencias de la Universidad de Barcelona, 5-12.
- Gómez-Pujol, Ll. 2006. *Patrons, taxes i formes d'erosió a les costes rocoses carbonatades de Mallorca*. Tesis doctoral inèdita. Departament de Ciències de la Terra, Universitat de les Illes

- Balears. 200 pp.
- Gómez-Pujol, Ll. i Fornós, J. J. 2004. Tasas de meteorización química en la costa carbonatada de Mallorca. Evaluación preliminar mediante tests de exposición (weight-loss rock tablets). En: Blanco, R., Bedoya, J., Pérez-Alberti, A. (Eds.). *Procesos geomorfológicos y evolución costera*. SPUSC, Santiago de Compostela. Comunicaciones, 401-410.
- Gómez-Pujol, Ll. i 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.
- Gómez-Pujol, L., Balaguer, P. i Fornós, J.J. 2002. Meteorización del patrimonio histórico en ambientes costeros marinos: el caso de la Torre d'en Beu (Santanyí, Mallorca). En: Serrano, E. et al., (Eds.). *Estudios recientes (2000-2002) en Geomorfología*. PUV, Valladolid. Comunicaciones: 403-413.
- Goto, K., Chagué-Goff, C., Fujino, S., Goff, J., Jaffe, B., Nishimura, Y., Richmond, B., Sugawara, D., Szczucinski, W., Tappin, D. R., Witter, R. C. i Yulianto, E. 2011. New insights of tsunami hazard from the 2011 Tohoku-oki event. *Marine Geology* 290, 46-50.
- Gràcia, F. i Vicens, D. 1998. Aspectes geomorfològics quaternaris del litoral de Mallorca. In: Fornós, J. J. (Ed.). *Aspectes geològics de les Balears*: 307-329. Universitat de les Illes Balears. Palma.
- Hall, A. M. 2011. Storm wave currents, boulder movement and shore platform development: a case study from East Lothian, Scotland. *Marine Geology* 283, 98-105.
- Harbi, A., Benouard, D. i Benhallou, H. 2003a. "Re-appraisal of Seismicity and Seismotectonics in the North-Eastern Algeria, Part I: Review of Historical Seismicity". *Journal of Seismology*, Vol. 7, No. 1, pp. 115-136.
- Harbi, A., Maouche, S. i Benhallou, H. 2003b. "Re-appraisal of Seismicity and Seismotectonics in the North-Eastern Algeria, Part II: 20th Century Seismicity and Seismotectonics Analysis". *Journal of Seismology*, Vol. 7, No. 2, pp. 221-234.
- Hébert, H. i Alasset, P. J. 2003. The Tsunami Triggered by the 21 May 2003 Algiers Earthquake. *EMSC Newsletter, Centre Sismologique Euro-Méditerranéen*, Vol. 20, pp. 10-12.
- Henares, J., López Casado, C., Sanz de Galdeano, C., Delgado, J. i Peláez, J. A. 2003. Stress Fields in the Iberian-Maghrebi Region. *Journal of Seismology*, Vol. 7, No.1, pp. 65-78.
- Keating, B. H. i McGuire, W. J. 2000. Island edifice failures and associated hazards. *Pure Appl. Geophys.* (Special Issue: Landslide and Tsunamis) 157, 899-955.
- Keating, B. H., Helsley, C. E., Wanink, M. i Walker, D. 2011. Tsunami Deposit Research: Fidelity of the Tsunami Record, Ephemeral Nature, Tsunami Deposits Characteristics, Remobilization of Sediment by Later Waves, and Boulder Movements. *The Tsunami Threat - Research and Technology*, 19; 389-342.
- 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.
- Kelletat, D., Whelan, F., Bartel, P. i Scheffers, A. 2005. New Tsunami evidences in Southern Spain Cabo de Trafalgar and Mallorca Island. In: Sanjaume E., Matheu J. F. (Eds.). *Geomorfologia Litoral I Quaternari, Homenatge al professor Vincenç M. Rosselló i Verger*. Universitat de València, Spain, pp. 215-222.
- Marone, F., Van Der Lee, S. i Giardini, D. 2004. "Three-Dimensional Upper-Mantle S-Velocity Model for the Eurasia-Africa Plate Boundary Region". *Geophysical Journal International*, Vol. 158, No. 1, pp. 109-130.
- Martín-Prieto, J. Á., Rodríguez-Perea, A., Roig-Munar F.X. i Gelabert B. 2018 Acumulación de bloques sobre un acantilado en la costa sur de Mallorca (s'Estalella) a partir de un temporal. In: Garcia, C., Gómez-Pujol, L., Morán-Tejeda, E. i Batalla, R.J. (Eds). *Geomorfología del antropoceno. Efecto del cambio global sobre los procesos geomorfológicos*. 99-102.
- Martínez-Solares, J. M. 2001. *Los efectos en España del terremoto de Lisboa (1 de noviembre de*

- 1755). Dirección General del Instituto Geográfico Nacional, 756 pp.
- Martínez-Solares, J. M. i Mezcuca-Rodríguez, J. 2002. *Catálogo sísmico de la Península Ibérica (880 a. C.-1990)*. Dirección General del Instituto Geográfico Nacional, pp. 253.
- Nott, J. 2003a. Waves, coastal boulder deposits and the importance of the pre-transport setting. *Earth and Planetary Science Letters* 210, 269-276.
- Nott, J. 2003b. 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.
- Ouyed, M., Meghraoui, M., Cisternas, A., Frechet, J., Gaulon, R., Hatzfeld, D. i Philip, H. 1981. Seismotectonics of the El-Asnam earthquake. *Nature* 292: 26-31.
- Roger, J. i 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., Martín-Prieto, J.A, Rodríguez-Perea, A., Pons, G.X., Vilaplana, J. M. i Gelabert, B. 2013a. Processos erosius als penya-segats de la Mola de Maó, Menorca. *VI Jornades de Medi Ambient de les Illes Balears (2013)*. Ed Pons. G. X., pp 72-74.
- Roig-Munar, F. X., Martín-Prieto, J. A, Rodríguez-Perea, A., Pons, G. X. i Mir-Gual, M. 2013b. Morfogènesi i dinàmica de la platja des Codolar (Eivissa, Illes Balears). *Bolletí de la Societat d'Història Natural de les Balears*, 55: 47-62.
- Roig-Munar, F. X., Rodríguez-Perea, A., Martín-Prieto, J. A, Pons, G. X., Vilaplana, J. M. i Gelabert, B., Pons, G. X. i Mir-Gual, M. 2013c. Presència de blocs acumulats a terrasses i penya-segats marins a les illes de Menorca i Mallorca: tsunamis o tempestes? *VI Jornades de Medi Ambient de les Illes Balears. Ponències i Resums*. Societat d'Història Natural de les Illes Balears, pp 62-64.
- Roig-Munar, F.X., Rodríguez-Perea, A., Martín-Prieto, J. A, Vilaplana, J. M., Gelabert, B., Pons, G. X. i 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 multidisciplinar al estudio de las fallas activas, los terremotos y el riesgo sísmico*, pp. 125-128. Segunda Reunión Ibérica sobre fallas activas y paleosismología, Lorca (Murcia, España).
- Roig-Munar, F.X., Rodríguez-Perea, A., Martín-Prieto, J. A, Vilaplana, J. M. i Gelabert, B. 2015. Morfometría de bloques de tsunami en las costas rocosas del Este de Mallorca (Islas Baleares). VIII Jornades de Geomorfologia litoral, *Revista Geo-Temas, Vol 15*. Málvarez, G. et al. (Eds.), 229-232.
- Roig-Munar, F. X. 2016. Blocs de tempesta i tsunami a les costes rocoses de les Illes Balears. Anàlisi geomorfològica i morfomètrica. Tesis doctoral. Departament de Geodinàmica i Geofísica. Universitat de Barcelona, 410 pp
- Roig-Munar, F.X., Martín-Prieto, J.A., Rodríguez-Perea, A., Gelabert Ferrer, B. y Vilaplana Fernández, J.M. 2017. Morfometria y dinámica de bloques asociados a tsunami en una rampa litoral del Norte de Menorca (Illes Balears). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 30(1): 97-111.
- Roig-Munar, F. X., Vilaplana, J. M., Rodríguez-Perea, A., Martín-Prieto, J. Á., i Gelabert, B. 2018. Tsunamis boulders on the rocky shores of Minorca (Balearic Islands). *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 18: 1985-1998, <https://doi.org/10.5194/nhess-18-1985-2018>.
- Roig-Munar, F.X., Rodríguez-Perea, A., Martín-Prieto, J.Á., Gelabert, B. i Vilaplana, J.M. 2019a. Tsunami boulders in Majorca Island (Balearic Islands, Spain). *Geomorphology*, 334: 76-90.
- Roig-Munar, F.X., Rodríguez-Perea, A., Vilaplana, J.M., Martín-Prieto, J.Á., i Gelabert, B. 2019b. Tsunami Boulders on the Rocky Coasts of Ibiza and Formentera (Balearic Islands) *J. Mar. Sci. Eng.* 7, 327; doi:10.3390/jmse7100327
- Sahal, A., Roger, J. i Allgeryer, 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. i Kelletat, D. 2003. Sedimentologic and geomorphic tsunami imprints worldwide - a review. *Earth-Science Review*, 63: 83-92.
- Tinti, S., Armigliato, A., Pagnoni, G. i Zaniboni, F. 2005. Scenarios of giant tsunamis of tectonic origin in the mediterranean. *Journal of Earthquake Technology*, núm. 464, Vol. 42-4: 171-188.
- Wang, X. i Liu, P. L. F. 2005. A numerical investigation of Boumerdes-Zemmouri (Algeria) earthquake and tsunamis. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 10: 171-183.

