

Blocs amb origen tsunamític a les costes rocoses del Nord-est de Mallorca (Illes Balears)

Francesc Xavier ROIG-MUNAR, José Ángel MARTÍN-PRIETO, Antonio RODRÍGUEZ-PEREA, Joan Manel VILAPLANA i Bernadí GELABERT

SHNB



SOCIETAT
D'HISTÒRIA
NATURAL DE LES
BALEARIS

Roig-Munar, F.X., Martín-Prieto, J.A., Rodríguez-Perea, A., Vilaplana, J.M. i Gelabert, B. 2016. Blocs amb origen tsunamític a les costes rocoses del Nord-est de Mallorca (Illes Balears). *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 59: 69-88. ISSN 0212-260X. Palma de Mallorca.

Les costes rocoses del Nord Est de Mallorca, Illes Balears, presenten acumulacions de blocs de mida mètrica que han estat transportats terra endins per forts fluxos hídrics de tsunamis i/o tempestes. Aquests blocs es disposen tant de manera individual com en agrupacions imbricades, sense arribar a formar cordons ben definits, a alçades que van de 1 a 15 m s.n.m i a distàncies terra endins fins als 55 m. La majoria dels blocs són angulosos i el seu pes oscil·la entre 3,5 i 24,5 T. Aquest treball presenta 5 àrees d'estudi on s'han realitzat l'anàlisi morfomètric dels blocs i s'han aplicat equacions per determinar les columnes d'aigua necessàries pel seu transport baix tres supòsits diferents: blocs submergits, blocs subaeris i blocs condicionats per juntes.

Paraules clau: *costa rocosa, Mallorca, morfometria de blocs, tempestes, tsunamis.*

Tsunami blocks on rocky shores north-east of Majorca (Balearic Islands). The rocky shores of the NE Mallorca (Balearic Islands) have accumulations of boulders that have been transported inland by strong water flows from tsunamis and / or storms. These blocks are arranged both individually and in groups, sometimes with an imbricated setting. They are located at heights ranging from 1 to 15 m and distances up to 55 m inland. Most boulders are angular and its weight varies between 3.5 and 24.5 T. This paper shows the block morphometric analysis of five study areas and determines water columns needed for transportation under three different scenarios: submerged blocks, subaerial blocks and joint bounded blocks.

Key words: *boulder morphology, Mallorca, rocky coast, storms, tsunamis.*

F. X. ROIG-MUNAR, QUATRE, consultoria ambiental email: xiscoroig@gmail.com
J. A. MARTÍN-PRIETO i A. RODRÍGUEZ-PEREA Dept. de Geografia, grup de recerca BIOGEMED, J. M. VILAPLANA Grup RISKMAT, Dept. de Geodinàmica i Geofísica, Universitat de Barcelona; B. GELABERT, Dept. de Biologia, Universitat de les Illes Balears.

Recepció del manuscrit: 11-abril-16; revisió acceptada: 21-nov-16.

Introducció

Hi ha una evidència creixent que les costes rocoses són també sensibles a esdeveniments d'alta energia. Les acumulacions de blocs a sobre de penya-segats representen un tipus de dipòsit amb característiques que evidencien el seu transport per tempestes de gran energia (Suañez *et al.*, 2009) i/o tsunamis (Paris *et al.*, 2009). Sens dubte, molts dipòsits de blocs poden tenir un origen poligènic associat tant a tempestes severes com a tsunamis (Scheffers i Scheffers, 2006; Hall, 2011; Roig-Munar *et al.*, 2015), no obstant la distinció entre els blocs de tsunami i els blocs d'onatge es basa en un conjunt de criteris sedimentològics, morfològics, cronològics, estratigràfics i d'organització que cal tractar a cada unitat d'anàlisi (Scheffers i Kinis, 2014; Roig-Munar *et al.*, 2015).

La identificació de blocs transportats per tsunami o per tempesta és important pel reconeixement de l'ocurrència d'esdeveniments que es van produir en el passat (Nott, 2003) i per estimar les propietats hidràuliques que han actuat sobre ells (Engel i May, 2012). Tot i que no hi ha un únic patró que diagnostiqui els dipòsits, les diferents característiques morfològiques, juntament amb l'estudi detallat de cada àrea analitzada (Roig-Munar *et al.*, 2015), poden evidenciar el seu desplaçament per onatges i/o tsunamis (Paris *et al.*, 2011).

La conca mediterrània es caracteritza per una costa molt articulada que individualitza petites subconques ben definides, i on el clima marítim no està condicionat només per l'energia i velocitat del vent (Cañelles, 2010). Com a conseqüència d'aquesta disposició, al Mediterrani occidental la generació de l'onatge està condicionada per un fetch limitat, per la qual cosa les seves costes

podrien presentar indicadors ideals per identificar els efectes excepcionals que han donat lloc a la deposició i disposició de blocs (Mastronuzzi *et al.*, 2006). Aquestes acumulacions s'han analitzat recentment en diferents contextos tectònics i geomorfològics del Mediterrani oriental i occidental per intentar distingir el mecanisme responsable del seu emplaçament (Mastronuzzi i Sanso, 2000; Scheffers i Scheffers, 2007; Paris *et al.*, 2009; Roig-Munar *et al.*, 2015; Mottershad *et al.*, 2014; 2015). Aquests estudis testifiquen events en base a dipòsits de gran mida, com mega-blocs (Scicchitano *et al.*, 2007), mega-bermes (Maouche *et al.*, 2009), o esclavissades (Vött *et al.*, 2006).

En general a la mar Mediterrània la presència de grans blocs s'atribueix a tsunamis, no obstant això, també hi han evidències que l'emplaçament de alguns dels blocs ha estat produït per tempestes extremes (Biolchi *et al.*, 2015) i d'altres representen processos mixtos de tempestes i tsunami (Roig-Munar *et al.*, 2015; Biolchi *et al.*, 2015). Actualment, diferents equacions permeten establir les condicions hidrodinàmiques de deposició dels blocs cada vegada amb més precisió, això afavoreix destriar fenòmens d'onatge i/o tsunami, i són arguments fermes que permeten interpretar el fenomen que té lloc a cada àrea (Scheffers i Kinis, 2014).

La presència de blocs d'ordre mètric acumulats sobre les costes rocoses de Mallorca ha estat un tema poc tractat i que genera debat sobre la seva gènesi, associada conjunta o separatament a tsunamis i/o tempestes (Kelleat i Shellmann, 2002; Roig-Munar *et al.*, 2014; 2015). Tot i que aquests blocs ja son citats per Butzer (1963) i Cuerda *et al.* (1991), el seu anàlisi és un tema recent en la producció científica de Mallorca. La presència de blocs és tractada per Bartel i Kelleat (2003), Sheffers i

Kelletat (2003) i Kelletat *et al.* (2005) a algunes àrees de Mallorca, on aporten dades que relacionen blocs sobre plataformes carbonatades amb processos mixtes de tempestes i tsunamis, utilitzant equacions simples, com el *Transport Figure* (Scheffers i Kelletat, 2003), per discernir els blocs desplaçats per uns fenòmens dels altres.

Kelletat *et al.* (2005) i Scheffers *et al.* (2008) dataren alguns blocs de la costa S i NE de Mallorca mitjançant radiocarboni. Roig-Munar *et al.* (2014; 2015) realitzaren estudis sobre blocs a les costes de Mallorca, aplicant diferents equacions per tal de distingir entre els blocs associats a les tempestes i als tsunamis, així com la relació d'aquests darrers amb les trajectòries de tsunamis provinents del Nord d'Àfrica. A les costes de la Mediterrània nord-occidental i a les illes Balears van ser reconeguts blocs de tsunami per Scheffers i Kelletat (2003) i posteriorment per Roig-Munar *et al.* (2014; 2015), associant-los a diferents esdeveniments registrats a les Balears (Fontseré, 1918; Silva i Rodríguez, 2014) o bé a les fonts tsunamítiques que afecten a les illes (Roger i Hébert, 2008; Álvarez *et al.*, 2010; 2011; Periáñez i Abril, 2013).

El modelatge dels tsunamis és una eina important per predir el risc potencial de tsunami amb patrons d'inundació i empremtes sedimentàries, com ara la presència de blocs o de dipòsits arenosos al llarg de la costa (Paris *et al.*, 2010). Roger i Hébert (2008) realitzaren la modelització del tsunami de 1856 i la seva propagació cap a les illes Balears. Els resultats de la modelització numèrica mostren que la localització de la falla generadora es clarament discriminatòria pel que fa a les àrees afectades, i que la propagació del tsunami s'orientà més cap al S de França i cap a les illes Balears (Fig. 6). També

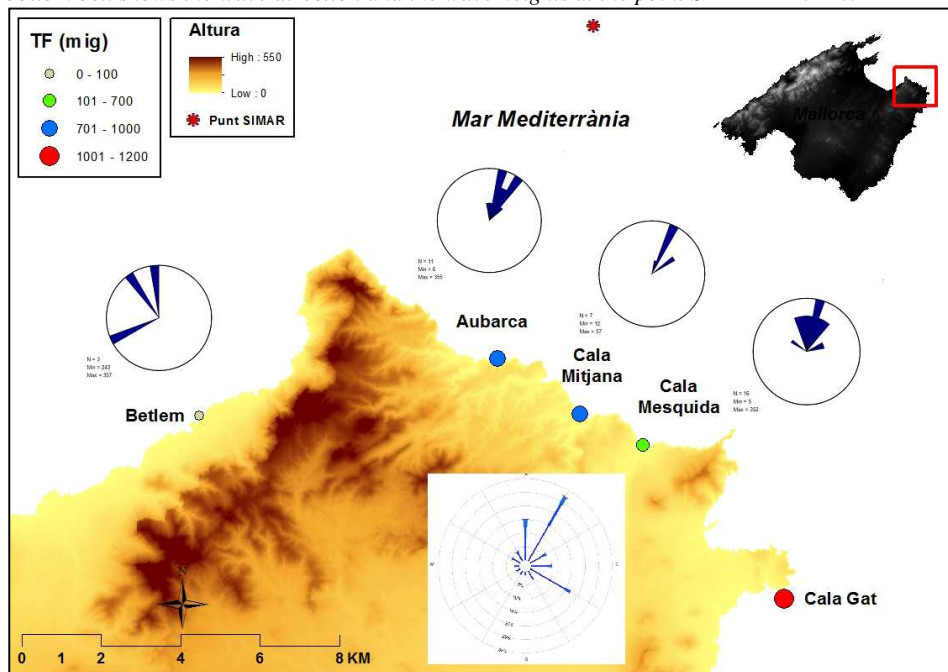
indiquen que alguns llocs, principalment al llarg de la costa E de Mallorca i del SE de Menorca, eren els més afectats per l'arribada de l'onada del tsunami i la seva amplificació.

Álvarez *et al.* (2010; 2011) realitzaren una modelització dels possibles tsunamis generats per fonts properes a la península Ibèrica i a les illes Balears. Aquest model es basà en l'esquema de diferències finites utilitzat per investigar diversos tsunamis històrics en el passat. 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). El domini de simulació realitzat cobreix el mar d'Alborán i d'Algèria juntament amb la conca Balear, calculant els temps de viatge del tsunami.

Els resultats obtinguts amb aquestes modelitzacions mostren mapes d'elevació d'ona màxima i de temps de viatge dels tsunamis, i permeten definir un mapa de trajectòries preferents per nou fonts tsunamítiques concretes (Álvarez *et al.*, 2010). Aquestes nou fonts sísmiques són de característiques similars a les responsables dels terratrèmols de al-Asnam (1980) i Boummerdes-Zemmouri (2003), que representen l'activitat de falles inverses de baix angle que cabussen cap al S i SE, capaces de generar terratrèmols d'intensitat 7.3. L'illa de Mallorca es veu afectada en major o menor mesura per totes les fonts generades al N d'Algèria. Algunes d'aquestes fonts tenen un major impacte en la part SE de l'illa i també al NE. El temps de viatge del tsunami per a les fonts més properes és d'uns 30 minuts a l'illa de Cabrera i de 35 minuts a la costa S, E i NE de Mallorca.

Fig. 1. Ubicació de les cinc àrees analitzades amb representació del *Transport Figure* (Scheffers i Kellett, 2003). Als cercles es representen les direccions dels blocs, mentre a la part inferior sobre un requadre, es mostra la direcció de l'onatge al punt SIMAR 2125118.

Fig. 1. Location of the five analysed areas and the average of *Transport Figure* (Scheffers and Kellett, 2003) of the blocs for each area. Circles represent the directions of blocks, while the rose in the bottom box shows the wave direction and the wave heights at the point SIMAR 2125118.



En aquest treball s'analitzen els blocs mètrics situats a les costes NE de Mallorca. S'han identificat cinc àrees amb presència significativa de blocs. La seva morfometria, cartografia, disposició sedimentaria i les seves relacions amb el tipus de costa a on se troben, ens permeten identificar el o els processos que han contribuït al seu transport.

Àrea d'estudi

Al NE de Mallorca, la península d'Artà presenta relleus de fins a 550 m, que són la prolongació de les serres de Llevant. En el seu litoral alternen petits entrants amb cales

amb una costa rocosa més o menys accidentada. Cada àrea analitzada presenta unes característiques geomorfològiques definides que condicionarán la presència i disposició dels blocs analitzats (Fig. 2). No obstant, totes elles presenten un patró en comú: la presència de blocs de grans dimensions amb morfologies de cordons o agrupacions de blocs imbricats ubicats sobre penya-segats o rampes litorals. En totes elles hem de descartar el seu emplaçament per processos gravitacionals ja que no existeix cap escarp proper que els pugui originar. La majoria de les àrees, excepte Cala Gat, presenten morfologies pre i post-deposicionals de cocons sobre els blocs.

Fig. 2. Imatges il·lustratives de cada àrea analitzada. A: Agrupació de blocs imbricats sobre una terrassa litoral a Betlem, B: Agrupació de blocs imbricats sobre penya-segats a Aubarca. C: Blocs dispersos sobre eolianites a Cala Mitjana. D: Blocs aïllats a cotes inferiors a la de la cornisa del penya-segat de Cala Gat E: Agrupacions de blocs imbricats i alguns blocs dispersos sobre rampes d'eolianites a Cala Mesquida.

Fig. 2. Pictures to illustrate each analysed area. A: Imbricated blocks on a coastal terrace in Betlem, B: groups of imbricated blocks over cliffs terraces in Aubarca. C: Scattered eolianite blocks in Cala Mitjana. D: Isolated blocks on lower levels of the altitude of the cliff edge of Cala Gat E: Imbricated and scattered blocks on eolianite ramps of Cala Mesquida



La morfologia dels penya-segats analitzats a les 5 àrees correspon a les següents tipologies: per una banda tenim dues àrees amb rampes de dunes fòssils adossades als penya-segats (Cala Mitjana i Cala Mesquida); són eolianites quaternàries adossades o que descansen sobre materials cretaci. Per un altre, Cala Gat es presenta com un petit sortint de materials del Juràssic amb un penya-segat vertical que supera els 10 m. Aubarca presenta un penya-segat de 4,5 m amb una suau pendent cap a terra sobre eolianites quaternàries, i finalment Betlem presenta una plataforma de materials plioquaternaris que queden truncades per la incisió de torrents i pels penya-segats costaners amb una alçada no superior a 0,5 m. Una descripció més general d'aquest litoral pot trobar-se a Gómez-Pujol *et al.* (2007).

Clima marítim

Una primera aproximació a la presència de blocs d'aquest sector costaner fou realitzada per Bartel i Kelletat (2003), que varen analitzar alguns blocs a Cala Mesquida, Betlem, Cala Estreta i Cala Gat. Aquests autors atribueixen alguns dels blocs a tsunamis, tant pels valors obtinguts de les equacions aplicades com per les formes d'imbricació que presenten molts d'ells. Pel que fa a la dinàmica marina que afecta a aquesta àrea d'estudi, es veu influenciada per els següents agents:

Les mareas a l'àmbit balear són negligibles. Les oscil·lacions de la pressió atmosfèrica són més influents que la pròpia marea en sí. Presenta valors que oscil·len al voltant de 0.3 m (www.puertos.es).

L'onatge està condicionat per un fetch reduït, amb una extensió màxima de 560 km cap el SE. Les dades de l'onatge (altura d'ona significant, Hs, i direcció) són proporcionades per l'ens públic Puertos del Estado (www.puertos.es), mitjançant el

conjunt de dades SIMAR. Aquestes dades estan formades per sèries temporals de paràmetres de vent i onatge, procedents de modelat numèric. De manera general, aquestes sèries temporals cobreixen un període de més de 50 anys, començant a l'any 1958, fins l'actualitat.

Per aquest treball, s'ha utilitzat el Punt SIMAR 2125118, situat a uns 10 km al N de la Península d'Artà (www.puertos.es) (Fig. 1). La distribució temporal de la altura significant y la seva direcció mostra que la major freqüència i sobretot, la major intensitat, tenen una clara component NNE, tot seguit de la component N amb un 27 i 15 % respectivament. En quant a la freqüència de la Hs, el 73% té una altura inferior a 1 m i tan sols el 0.15 % supera els 4.5 m. Las altures màximes registrades des de 1958, van tenir lloc el 9 de desembre de 2014, amb una altura de 7.7 m y un període de 12.5 s, amb una direcció procedent del NNE i el 25 de gener de 2015 amb una altura de 7.5 m, un període també de 12,5 s i una direcció també del NNE (www.puertos.es). La Hs50, s'estima en 9.88 m. Recents estudis sobre els run-up de grans tempestes (medicanes) permeten arribar a altures de fins 11 m (Jansà, 2013).

Material i mètodes

Per tal d'identificar el registre tsunamític del NE de Mallorca s'ha fet una recerca intensiva del seu litoral, primer analitzant les ortofotos disponibles i després mitjançant el treball de camp. Això ha permès identificar cinc àrees amb blocs potencialment procedents de tsunamis. A cada una d'elles, pel seu estudi s'han triat només els blocs de mida mètrica. D'aquesta manera s'ha caracteritzat la morfologia i el context geomorfològic d'un total de 59 blocs dipositats sobre les 5 àrees d'estudi

situades a penya-segats i terrasses litorals del NE de les Serres de Llevant (Fig. 1).

A cada àrea s'ha definit el següent:

1. Caracterització cartogràfica, geològica i geomorfològica a escala 1:1.000 amb base als mapes topogràfics i ortofotos de l'IDEIB (Infraestructura de Dades Espacials de les Illes Balears). La cartografia sintetitza la fisiografia de cada àrea, representant de forma esquemàtica processos morfo-genètics, morfoestructurals i morfodinàmics.

2. Caracterització dels perfils: es realitzà un perfil topogràfic i batimètric perpendicular a la costa per cada àrea. Els perfils informen del pendent de cada àrea, l'alçada i el tipus del penya-segat des de la isòbata -30 fins a l'inici de la cobertura vegetal terrestre. S'han utilitzat les fonts de l'IDEIB i la batimetria del Projecte Life Posidonia a escala 1:5000 (<http://cedai.imedeo.uib-csic.es>). Els factors considerats alhora de la classificació d'aquests perfils han estat tant l'altura com la morfologia de la costa a partir de les mesures i observacions fetes al camp. Les tipologies dels penya-segats considerades són: perfil baix, perfil vertical de 0 a 5 m i perfils superiors als 8 m. Els perfils corresponen a penya-segats alts i a costes rocoses amb presència de blocs, segons la classificació de Balguer (2012).

3. Caracterització morfomètrica del blocs:

a. De cada bloc s'han obtingut els valors de l'eix llarg (A), intermedi (B) i curt (C), que freqüentment coincideix amb la potència de l'estrat del qual prové el bloc. Per tal de determinar el volum més fiable, i al ser aquestes dades una simplificació del volum del bloc, s'han realitzat triangulacions a un escandall de blocs per tal d'obtenir un volum més aproximat al real que el que dona el simple producte $A*B*C$ (Roig-Munar *et al.* 2015).

Aquesta tècnica permet obtenir les àrees de formes poligonals, normalment irregulars, i mitjançant la seva descomposició en formes prismàtiques formant una malla, on la suma dels prismes dona com a resultat el total del volum.

b. De cada bloc també s'han obtingut valors de la seva orientació i cabussament, així com la seva cota topogràfica i la distància a la línia de costa, prenent com a referència el centre del bloc.

c. S'han calculat les densitats dels blocs d'acord amb les litologies presents a cada àrea, -calcaries i dolomies del Juràssic i calcarenites del Quaternari- mitjançant la relació volum/pes calculats per immersió i pes de fragments representatius.

4. Disposició sedimentària: s'ha registrat la presència de blocs aïllats, grups de blocs imbricats, cordons de blocs imbricats, i/o presència de blocs recentment arrabassats. Aquestes dades permeten destriar diferències sedimentològiques entre diferents fluxos (Paris *et al.*, 2011).

5. Observacions qualitatives com són: la disposició dels blocs respecte l'estratificació de la zona i la seva relació amb l'àrea font (Roig-Munar *et al.*, 2014), la presència de fractures que poden afavorir l'arrabassament dels blocs exposats i la presència de blocs amb incrustacions de fauna marina endolítica, que indica l'origen del bloc abans del seu desplaçament (Bishop i Hughes, 1989).

6. Presència de morfologies pre-deposicionals –generades abans de l'arrabassament del bloc- com *notch* i cocons (Fig. 2B) i post-deposicionals –generades després del trasllat del bloc- cocons, impactes, etc. Totes aquestes dades permeten identificar moltes vegades la posició inicial i final dels blocs, així com de les superfícies d'abradió corresponents als blocs desmantellats.

7. Grau d'arrodoniment dels blocs, presència de sediment a cada àrea (Goto *et al.*, 2011) i de superfícies d'abrasió. S'ha observat també la presència d'impactes de petita mida i d'abrasions a superfícies rocoses properes a la línia de costa (Balaguer, 2006).

8. Existència de blocs associats a morfologies de *flowouts*: canals submergits o a terra, sobre el penya-segat, que afavoreixen l'entrada i acceleració de fluxos de d'aigua amb transport i deposició de blocs terra endins (Roig-Munar *et al.*, 2014).

Anàlisi hidrològica

Per tal d'establir les condicions hidrodinàmiques en que se varen arrabassar, transportar i dipositar aquests blocs, s'han fet servir diverses equacions matemàtiques.

Les equacions de Nott (2003) i Engel i May (2012), àmpliament utilitzades, permeten, aplicades a cada bloc, calcular els valors hidrodinàmics necessaris per l'arrabassament, desplaçament i deposició dels blocs baix diferents supòsits: bloc submergit, bloc subaeri i bloc delimitat per fractures. S'han triat les equacions de Nott (2003) com les primeres i més bàsiques per determinar l'ordre de magnitud dels processos hidrodinàmics i s'han comparat els seus resultats amb les equacions de Engel i May (2012), que matisen les de Nott establint un joc d'esforços més complex. Totes elles ens permeten establir o descartar els diferents escenaris d'onatge i/o de tsunamis que han donat lloc a la creació d'aquests dipòsits.

Així mateix, s'han calculat els valors del *Transport Figure*, de Scheffers i Kelletat (2003) que, tot i la seva simplicitat, recull, sigui tan sols de manera semi-quantitativa, tots els paràmetres avaluadors essencials (pes, alçaria, i distància a la costa

de cada bloc) de l'energia necessària per produir l'arrabassament i transport de cada bloc.

Les equacions aplicades són les següents:

a) *Equació de Nott (2003)*: calcula els valors hidrodinàmics necessaris per l'arrabassament i desplaçament de blocs sota tres diferents supòsits:

(1) Blocs submergits:

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

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

(2) Blocs sobre plataformes o rases:

$$H_t = [0,25(\rho_s - \rho_w / \rho_w) ((2a - C_m(a/b)(\ddot{u}/g))] / [Cd(ac/b^2) + Cl]$$

$$H_s = [(\rho_s - \rho_w / \rho_w) ((2a - 4C_m(a/b)(\ddot{u}/g))] / [Cd(ac/b^2) + Cl]$$

(3) Blocs controlats per juntes:

$$H_t = [0,25(\rho_s - \rho_w / \rho_w)a] / Cl$$

$$H_s = [(\rho_s - \rho_w / \rho_w)a] / Cl$$

On H_t i H_s són les alçades d'ona trencant necessàries pel desplaçament o arrabassament de blocs amb un escenari de tsunami (H_t) i de tempesta (H_s); ρ_s i ρ_w són les densitats del bloc i de l'aigua de la mar; a és l'eix llarg, b és l'eix mig del bloc i c el eix curt. Cl i C_m són coeficients empírics d'elevació i massa, Cd es el coeficient d'arrossegament, g és la constant de gravetat i \ddot{u} el flux d'acceleració.

b) *Equacions d'Engel i May (2012)*: aquests autors aporten com a novetat la redimensió dels blocs mitjançant el càlcul d'un volum més real per a cadascun d'ells, reduint els volums inicials obtinguts amb la multiplicació dels eixos A, B i C per un factor corrector obtingut amb tècniques fotogramètriques. Aquests autors també utilitzen el pendent de la base dels blocs, ja que els blocs se separen de la plataforma en funció de paràmetres morfològics exposats a l'arribada de l'ona. Aquestes equacions són les més utilitzades en els darrers estudis de morfometries de blocs de tsunami (Biolchi *et al.*, 2015; Roig-Munar *et al.*, 2015; May *et al.*, 2015).

Engel i May (2012) proposen sendes equacions pels blocs delimitats per fractures:

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

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

En elles, HT es l'altura de l'ona de tsunami, HS es l'altura de l'ona de temporal, θ el pendent de la base dels blocs, μ el coeficient de fricció estimat en 0,65, C_L el coeficient de sustentació, estimat en 0,178 i q un coeficient d'àrea del bloc valorat en 0,73.

Pel que fa als blocs subaeris, Engel i May (2012) utilitzen les següents equacions:

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

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

A on C_D és el coeficient d'arrossegament, estimat per aquests autors en 1,95.

Un enfocament numèric diferent s'empra per estimar la distància màxima d'inundació de tsunami (X_{max}). Aquest paràmetre es depenent de l'alçada del tsunami (HT) i la rugositat de la superfície. Segons Pignatelli *et al.* (2009) aquesta estimació es basa amb la distància terra endins on es troba el bloc més gran (D) i el pendent de l'angle de la superfície de la plataforma (α) en la seva cornisa:

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

A on hc es l'altura del penya-segat, n el nombre de Manning i k una constant estimada en 0,06 per la majoria de tsunamis.

Els resultats estan significativament condicionats per les alçades d'ona més realistes que s'obtenen de les estimacions realitzades per Nott (2003) i Nandasena *et al.* (2011), i que es basen en supòsits simplificadors relatius als blocs i als processos de transport.

Per tenir una estimació de les columnes d'aigua necessàries pel desplaçament dels blocs a sobre del penya-segat (Roig-Munar *et al.*, 2015), als resultats de les equacions de Nott (2003) i Engel i May (2012) se li ha de sumar el valor real de l'alçada del penya-segat a la seva cornisa.

Finalment, s'ha utilitzat la fórmula de Scheffers i Kelletat (2003) denominada *Transport Figure (TF)*: es tracta d'una equació força simple que consisteix amb 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 a on es troba el bloc sobre el nivell del mar (H) també en metres.

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

El *Transport Figure (TF)* simplifica les formulacions revisades, els llinars i les condicions per discernir l'ona de tempesta de l'ona de tsunami. Es tracta d'una fórmula poc utilitzada en l'estudi de la hidrodinàmica dels blocs, tot i que, en definitiva és una bona aproximació a l'energia necessària pel transport de cada bloc. Segons Scheffers i Kelletat (2003) en aplicar-la en Mallorca, els valors de TF fins a 230 són blocs transportats per l'onatge de tempesta, metres que un TF superior a 250 és el resultat del transport per tsunamis. Aquesta equació també ha estat utilitzada per Keating i McGuire (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, on per tal d'establir un marge de seguretat s'estableix de forma arbitrària un $TF > 1.000$ com a llinar per destriar tsunami de tempestes. L'ús del valor $TF > 1.000$ diferencia de forma clara tots dos orígens, amb un valor superior a l'establert per Scheffers i Kelletat (2003), i tot i aplicant una reducció significativa (38% del valors $A \cdot B \cdot C$) al càlcul del volum dels

blocs amb base als resultats de la seva triangulació. La totalitat dels blocs amb $TF > 1.000$ analitzats a aquest treball i a la resta de les Balears -més de 1.100 blocs- corresponen a blocs transportats per tsunamis, segons les equacions hidrodinàmiques esmentades (Roig-Munar, 2016). No obstant, no es pot dir el contrari per valors de $TF < 1.000$. En aquests casos l'atribució a tsunamis, a tempestes o a processos mixtes no es automàtica, si be els valors més petits apunten a la participació de tempestes amb major probabilitat.

Resultats i discussió

Els resultats obtinguts de la caracterització dels blocs, dels seus emplaçaments, juntament amb el règim d'onatge dominant, la cartografia i les dades morfològiques de cada àrea, permeten tenir una visió més detallada dels diferents processos que hi actuen i relacionar-ho amb les forces hidràuliques produïdes per diferents fluxos sobre els penya-segats analitzats.

Per tal de determinar un volum més real dels blocs, els resultats obtinguts en la mesura directa mitjançant els tres eixos principals ($V = A * B * C$) s'han ajustat mitjançant els resultats de la triangulació d'un conjunt de blocs representatius. Un cop triangulats s'ha obtingut un valor mig del 62% de volum inicial mesurat amb els tres eixos simples. Aquest factor de correcció s'ha aplicat a tots els blocs (59), reduint d'aquesta manera els valors obtinguts amb la morfometria simple en un 38%. Així, s'ajusten amb major fiabilitat els resultats volumètrics de cada bloc.

Les densitats dels blocs són decisives per inferir les alçades mínimes requerides pels diferents fluxos que els han mogut; així establim dades mes realistes de l'altura

d'ona per tal de realitzar una clara distinció entre tsunamis o tempestes (Spiske *et al.*, 2010). Els blocs mesurats es troben sobre litologies juràssiques i quaternàries. En aquest cas s'han mesurat les densitats individuals per cada àrea de mostreig, homogeneïtzant aquelles que presenten les mateixes característiques litològiques. La densitat obtinguda és de 2,56 per les calcàries del Juràssic i 1,89 per les calcarenites del Quaternari.

De cadascuna de les àrees s'han pres diferents observacions morfològiques que permeten relacionar els blocs amb l'àrea on se troben i amb els processos que han ajudat al seu arrabassament, desplaçament i deposició (Barbano *et al.*, 2010; Goto *et al.*, 2011). Conjuntament amb la cartografia geomorfològica, les modelitzacions de trajectòries de tsunamis, els perfils de l'àrea, l'anàlisi morfomètrica dels blocs i l'onatge, ens permetran contextualitzar cada una de les àrees estudiades.

Els resultats de totes aquestes observacions han estat valorades numèricament amb valors de 0 a 3 d'acord amb absència, presència i/o abundància i segons dades categoritzades en: presència de blocs aïllats (BA), presència de cordons (CO), presència de blocs recentment arrabassats (AR), presència de blocs arrodonits (RD), presència de fracturació (FR), presència de *flowouts* (FW), presència d'impactes de roques sobre plataformes litorals (IR) i presència de morfologies postdeposicionals (MP) (Taula 1).

S'ha calculat el valor del *Transport Figure (TF)* dels 59 blocs analitzats, i com es pot observar a la Fig. 3 i a la Taula 2, tan sols 17 dels blocs (el 28,8%), es situen per sobre de $TF > 1.000$, el qual i com s'ha mencionat abans, és un llindar de seguretat per poder establir els tsunamis com la seva principal font de transport.

Taula 1. Paràmetres morfològics característics de les cinc àrees analitzades: absència (0) / presència (1) / abundància (2) / o molta abundància (3) de blocs aïllats (BA), de cordons imbricats (CO), de blocs recentment arrabassats (AR), de blocs arrodonits (RD), de fracturació (FR), de flowouts (FW), d'impactes de roques sobre plataformes (IR) i de morfologies postdeposicionals (MP).

Table 1. Morphological parameters recorded in the five analysed areas: absence (0) / presence (1) / abundance (2) or high abundance (3) of isolated blocks (BA), of imbricated ridges (CO), of recently quarried blocks (AR), of rounded blocks (RD), of fractures (FR), of flowouts (FW), of rock impacts on platforms (IR), and post-depositional morphologies (MP).

Àrea	BA	CO	AR	RD	FR	FW	IR	MP
Betlem	1	3	0	2	1	0	2	2
Aubarca	3	1	0	0	2	2	1	2
Mitjana	2	1	0	0	1	0	1	2
Mesquida	2	3	0	0	1	0	1	2
Gat	2	1	0	0	1	2	0	0

Les 5 àrees analitzades presenten valors mitjans de TF de 763, pels 59 blocs, i les seves mesures mitjanes dels eixos A, B i C són de 2,96 x 2,3 x 0,84 m, amb un pes mitjà de 8,36 T. Estan situats a una alçada mitjana de 6 m s.n.m. i a una distància mitjana de 19,79 m de la cornisa del penya-segat. Els blocs amb TF>1.000 presenten

una mitjana dels valors de TF de 1.358, amb dimensions mitjanes dels eixos A, B i C de 2,75 x 2,14 x 0,92 m, amb un pes mitjà de 7,13 T, situats a una alçada mitjana de 8,38 m s.n.m. i a una distància mitjana de 29 m de la cornisa del penya-segat (Fig. 3 i Taula 2). És a dir, són lleugerament més

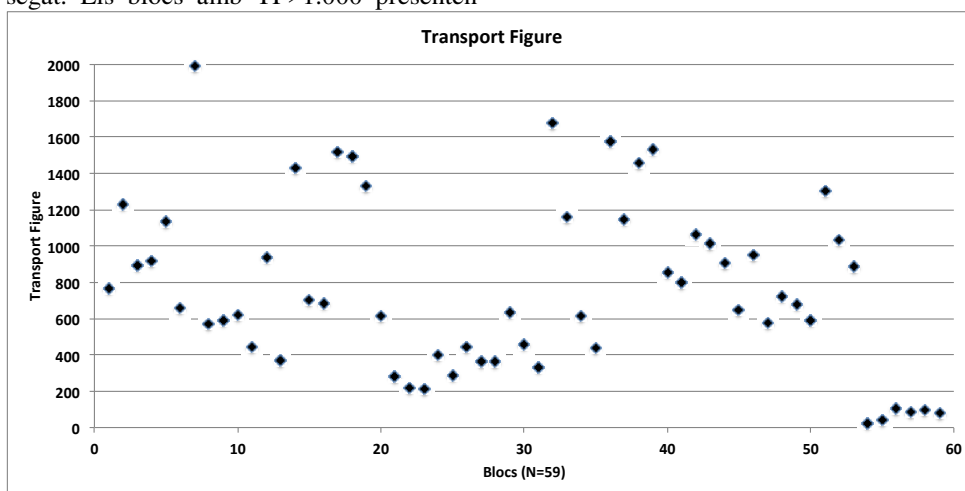


Fig. 3. Transport Figure (Scheffers and Kelletat, 2003) dels 59 blocs analitzats a les cinc àrees d'estudi.

Fig. 3. Transport Figure (Scheffers and Kelletat, 2003) of the 59 blocks measured in the five study areas.

Taula 2. Valors mitjans obtinguts per a cada àrea d'estudi. Valors mitjans per els 59 blocs (N59) i pels blocs superiors a TF>1000 (N17). A, B i C dimensions mitjanes en metres dels eixos llarg (A), mig (B) i curt (C). DIR.: direcció mitjana en graus (0° a 360°). DIS.: distància mitjana en metres a la vora del penya-segat. ALÇ.: alçària mitjana en metres sobre el nivell de la mar. Pes: Pes mitjà en tones mètriques. TF: *Transport Figure*.

Table 2. Mean values obtained for each study area. Mean values for the 59 blocks (N59) and the blocks with TF > 1000 (N17). A, B and C are the averages of the dimensions of the blocks, in metres, for the long axis (A), intermediate (B) and short (C). DIR.: average direction of the dip of the blocks in degrees (0 degrees to 360 degrees). DIS.: average distance in meters from the block to the edge of the cliff. ALC.: average height of the blocks in meters above the sea level. Pes: Average weight in metric tons. TF: *Transport Figure*.

	A	B	C	DIR.	DIS.	ALÇ.	Pes	TF
N59	2,96	2,30	0,84	112,3	19,79	6,00	7,22	763
N17	2,75	2,14	0,92	71,11	29,00	8,38	7,13	1358
Aubarca	3,11	2,82	1,13	142,33	20,25	5,00	11,87	1104
Mitjana	2,85	2,27	0,96	54,0	32,00	7,50	7,57	1453
Mesquida	3,08	2,11	0,68	26,3	36,75	8,00	4,95	1443
Cala Gat	2,18	1,52	1,00		28,17	11,33	5,19	1425

petits, es troben a una alçària similar però molt més terra endins (un 50% més).

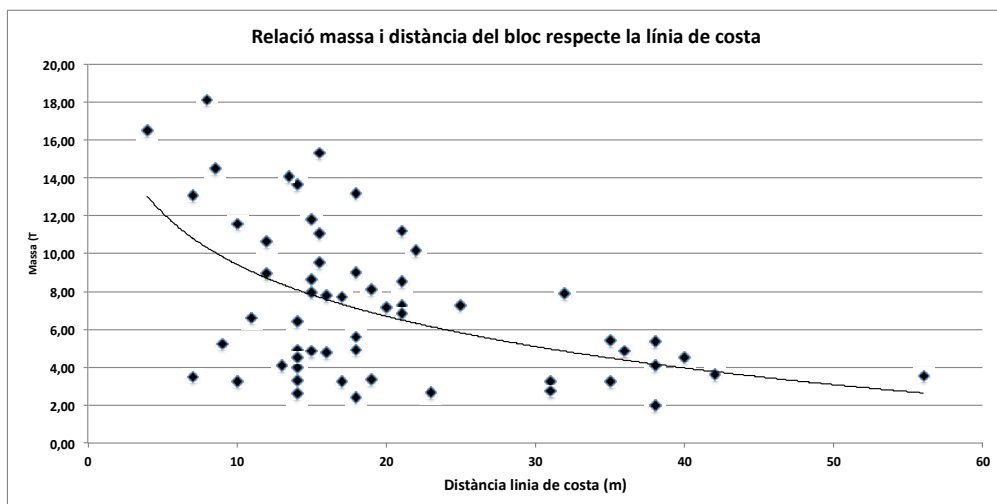
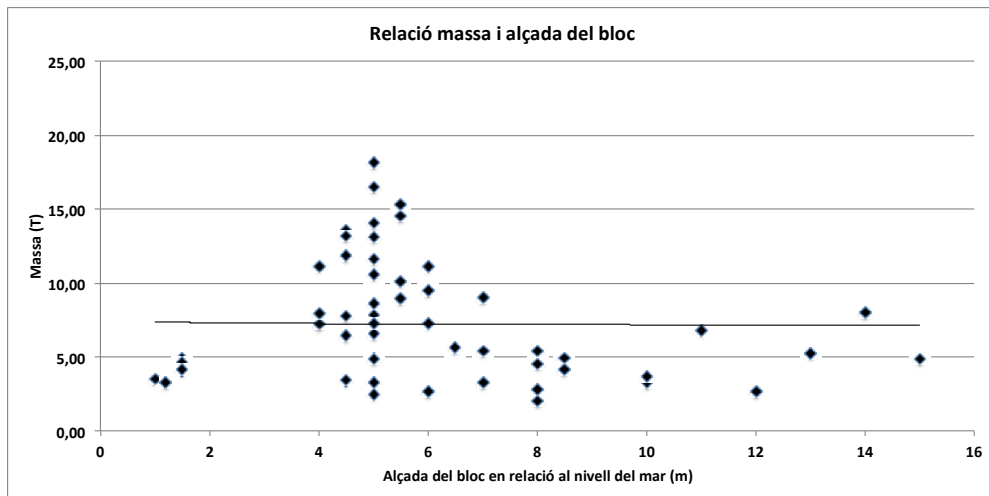
A la Fig. 4 a i b es representa la distribució dels 59 blocs en funció del seu *Transport Figure*. Observem a la Fig. 4a, que la major concentració de blocs se situa en tres franges d'alçades dominants, una entre el metre d'alçada, corresponent a Betlem, una segona entre els 4,5 i 5 m corresponents als blocs d'Aubarca i una tercera agrupació, corresponentment a Cala Gat, es situa sobre el 8 m s.n.m. Els blocs de Cala Mitjana i Cala Mesquida es distribueixen a alçades entre els 4,5 i 8 m s.n.m. Pel que fa a la distància dels blocs amb respecte la línia de costa (Fig. 4b), podem observar dues agrupacions dominants: una entre els 14 i 20 m de distància, amb pesos mitjans de 7,5 T i un altre, corresponent a Cala Mesquida, que presenta una distribució de distàncies compreses entre els 30 i 40 m depositats sobre plataformes de dunes fòssils.

Una vegada calculat el *Transport Figure* per cada àrea, els seus valors

mitjans i els màxims, el resultat és que a l'àrea de Betlem els blocs no assoleixen el TF 100. Per tant, malgrat la seva forma i disposició (Fig. 1, Fig. 2A), aquests blocs correspondrien a blocs de tempesta segons els valors de TF. Es tracta d'una àrea associada a un perfil baix i força planer on, no obstant, el grau d'arrodoniment dels blocs és escàs. La morfometria de l'àrea i la tipologia del perfil ens indica que es tracta de zones on hi actuen processos de tempesta, amb possibles retreballaments de blocs, tot i que presenten imbricacions que podrien indicar també una disposició associada a forts fluxos hídrics de caràcter tsunamític (Scheffers i Kinis, 2014; Roig Munar *et al.*, 2015) o bé a fluxos de mar vella. Als 59 blocs, se'ls ha aplicat les equacions de Nott (2003b) i Engel i May (2012), per a tal d'obtenir els valors d'altura d'onatge (Hs) i de tsunami (Ht) necessària per al seu desplaçament sota tres supòsits (Taula 3):

Fig. 4. Distribució dels blocs segons el *Transport Figure* (TF) en funció de la seva alçada sobre el nivell del mar (a) i de la distància a la costa en funció del seu pes (b).

Fig. 4. Distribution of blocks a) *Transport Figure* (TF) versus their height above sea level and b) the distance from the coast versus their weight (b).



Taula 3. Valors mitjans de la columna d'aigua necessària sota diferents supòsits de desplaçaments de blocs (submergit, subaeri i arrabassament) amb les equacions de Nott (2003) i Engel i May (2012) per tempestes (s) i per tsunamis (t). L'altura mitjana del penya-segat s'ha afegit als resultats de les diverses equacions.

Table 3. Mean values of the water column needed under different displacement assumptions: submerged, subaerial and join bounded blocks according to the Nott (2003) and Engel and May (2012) equations for storms (s) and tsunamis (t). Average height of the cliff is added to the equation results.

N59						Altura mitja del penyasegat		3,25	
Nott		Nott		Nott		Engel		Engel subaerial	
Submerged		Subaerial		Arrabassament		Arrabassament		Engel subaerial	
Ht	Hs	Ht	Hs	Ht	Hs	Ht	Hs	Ht	Hs
4,55	8,46	4,32	7,56	7,06	18,49	4,79	9,44	3,70	5,06
N17						Altura mitja del penyasegat		6,79	
Nott		Nott		Nott		Engel		Engel subaerial	
Submerged		Subaerial		Arrabassament		Arrabassament		Engel subaerial	
Ht	Hs	Ht	Hs	Ht	Hs	Ht	Hs	Ht	Hs
7,88	11,36	7,72	11,28	10,80	22,83	8,69	14,36	7,24	8,58

1. Blocs submergits,
2. Blocs subaeris i
3. Blocs delimitats per juntes.

Als resultats se l'hi ha afegit l'altura del penya-segat mesurada a la seva cornisa per tal d'obtenir les columnes d'aigua pel desplaçament de cada bloc sota els dos supòsits més freqüents: moviment subaeri o arrabassament i trasllat també subaeri.

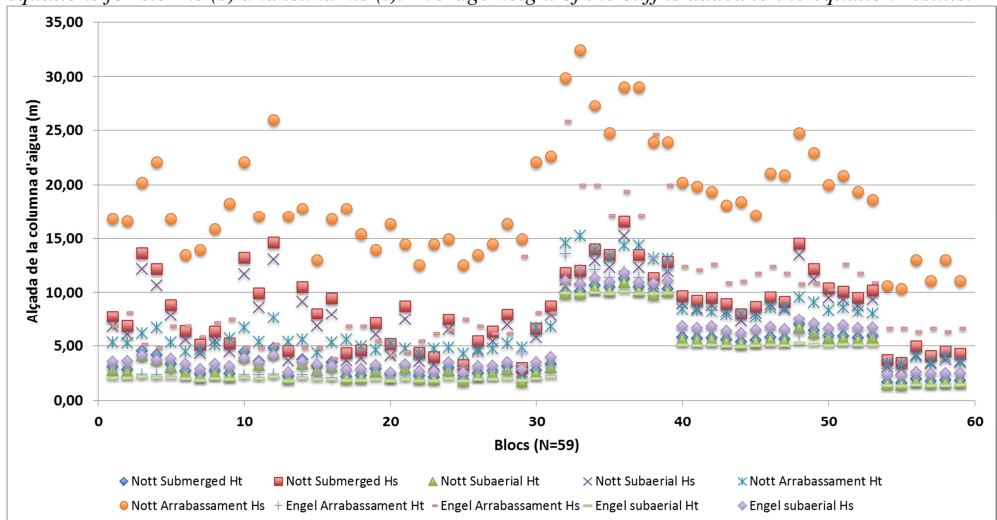
Per a l'anàlisi de tots els blocs (59), l'aplicació d'aquestes formules per blocs subaeris per tempestes (Hs), la mitjana de la columna d'aigua seria de 7,56 i 5,06 m segons Nott (2003) i Engel i May (2012) respectivament. En el cas de tsunamis (Ht), també per blocs subaeris, els valors serien de 4,32 i 3,70 m segons els mateixos autors. Quan es calculen els valors considerant que es tracta de blocs limitats per juntes, el seu arrabassament requereix onades que segons Nott (2003) i Engel i May (2012) arriben a 18,49 i 9,44 m respectivament, en el cas de tempestes i a 7,06 i 4,79 m en el supòsit de tsunamis.

A l'aplicar les equacions als blocs amb $TF > 1.000$ (17) les columnes d'aigua

necessària augmenten sensiblement. Així, pels blocs subaeris de tempestes (Hs), la mitjana de la columna d'aigua seria de 11,28 i 8,58 m, segons Nott (2003) i Engel i May (2012) respectivament. En el cas de tsunamis (Ht) els valors serien de 7,72 i 7,24 m respectivament. Els valors estimats per l'arrabassament de blocs limitats per juntes, en cas de tempestes i tsunamis per a blocs amb $TF > 1.000$, son encara majors. Així, en el cas de tempestes (Hs) els valors mitjans de la columna d'aigua són de 22,83 m i 14,36 m, per a Nott (2003) i Engel i May (2012) respectivament i de 10,80 i 8,69 m en el cas de les columnes d'aigua per tsunamis (Taula 3). Els resultats de l'alçada de l'ona en uns casos poden presentar diferències d'ordre centimètric, i en altres presentar diferències d'ordre mètric en funció de l'equació aplicada, diferències entre les dues equacions sense trobar-hi una relació entre el pes, alçada i distància (Burgès i MacInnes, 2010; Goto *et al.*, 2010). Les màximes utilitzades es produeixen en les estimacions de les ones de tempestes per a blocs limitats per juntes.

Fig. 5. Columnes d'aigües necessàries per a cada bloc mesurat per al seu desplaçament sota diferents supòsits (submergit, subaeri i arrabassament) segons les equacions de Nott (2003) i Engel i May (2012) per tempestes (s) i tsunamis (t). L'alçària mitjana del penya-segat s'ha afegit als resultat de les equacions.

Fig. 5. Water columns needed for each measured block under different displacement assumptions: submerged, subaerial and join bounded according to the Nott (2003) and Engel and May (2012) equations for storms (s) and tsunamis (t). Average height of the cliff is added to the equation results.



La Fig. 5 representa les columnes d'aigua necessàries pel desplaçament d'aquests blocs sota diferents supòsits. Els valors d'altura d'ona per a blocs arrabassats per tempesta, entre 15 i 20 m, ja ens informen que difícilment s'han donat tempestes amb columnes d'aigua d'aquestes magnituds que puguin afectar als blocs pel seu arrabassament, especialment a aquells amb valors de TF elevats (Fig. 2). No obstant, l'orientació dels blocs (Fig. 1) es troba molt propera als fluxos dels onatges de major freqüència i intensitat, que en aquest sector NE de Mallorca és del NNE. En efecte, l'orientació dominant dels blocs, mostra direccions procedents del NNE a Cala Mesquida, Cala Mitjana i Aubarca i del NW a Betlem (Fig. 1).

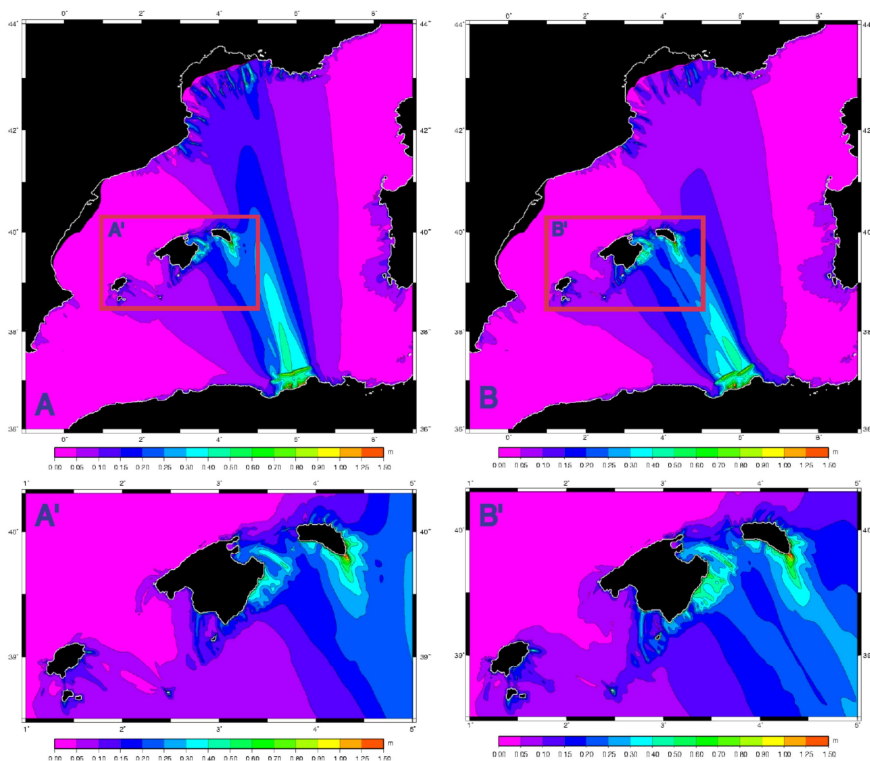
Per contra, les orientacions dominants dels blocs amb $TF > 1000$, és de 112° i de

71° direccions allunyades de les de l'onatge de tempesta dominant. A més, les columnes d'aigua necessàries pel seu desplaçament (Figs. 2 i 5), indiquen la necessitat de fluxos de major intensitat i competència que els que se'n deriven de les ones de tempesta.

Donat la presència, mida, disposició i orientació d'aquests blocs, podem de concloure, es troben associats a les orientacions de les trajectòries de tsunamis dels models S-6 i S-8 definides per Álvarez *et al.* (2011). Posteriorment en diverses àrees, especialment en les afavorides per uns perfils baixos com ara Betlem, Mitjana i Mesquida, són retreballats per tempestes.

L'orientació mitjana de tots els blocs podria indicar l'afectació de la costa per trajectòries tsunamítiques refractades al canal de Menorca pel seu impacte a la costa E de Mallorca i al S de Menorca (Roger i

Fig. 6. Modelització de las trajectòries de tsunamis des del Nord d'Àfrica per Roger i Hebert (2008).
Fig. 6. Modeling of the trajectories of tsunamis from the North Africa from Roger Hebert (2008).



Hébert, 2008), orientacions compatibles amb les simulacions realitzades per Álvarez-Gómez *et al.* (2010; 2011). De les 5 àrees analitzades, destaca Cala Gat, que presenta vuit blocs ubicats sobre penya-segats d'alçades superiors a l'altura màxima de l'onatge fins ara registrat i on el 100% dels blocs presenten valors de $TF > 1.000$.

Conclusions

A la costa NE de Mallorca es localitzen blocs de tempestes i/o tsunamis a cinc àrees (Fig. 1) que donen resposta a la hipòtesis de

propagació de tsunamis Roger i Hebert (2008). Aquests autors assenyalaven la presència de dipòsits de tsunamis a la Mediterrània occidental, amb especial atenció a les Illes Balears. A més, es correlacionen amb les modelitzacions de tsunamis realitzades tant pels autors anteriors (Fig. 6), com per Álvarez-Gómez *et al.* (2010; 2011) i per Periañez i Abril (2013).

L'aplicació de l'equació del *Transport Figure* (Scheffers i Kellat, 2003), permet, destriar blocs associats a diferents fluxos, tsunami i/o tempesta. No obstant això, és imprescindible analitzar cadascuna de les àrees i relacionar els processos actuals

(marques, onatges, morfologia de blocs, etc.), amb morfologies costaneres (terrasses, *flowouts*, etc.) per poder determinar clarament el seu origen. El sector NE de Mallorca es presenta com un sector mixt de tempesta i tsunami, on molts dels blocs i de les plataformes mostren símptomes de retreballament per onades. Les orientacions dels blocs de $TF < 1.000$ denoten la influència de l'onatge incident, mentre que les orientacions dels blocs amb $TF > 1.000$ són concordants amb les trajectòries dels tsunamis procedents de la costa d'Algèria.

L'aplicació de les equacions de Nott (2003b) i Engel i May (2012) permeten definir les columnes d'aigua necessàries per arrabassar i moure els blocs. En concret les altures mitjanes per tempestes sobre els blocs amb $TF > 1.000$, entre 15 i 20 m, descarten el seu origen per aquests fenòmens i juntament amb les altres característiques, obliga a considerar-los fruit de les ones de tsunamis.

L'anàlisi de les distintes àrees ens permet diferenciar les que presenten un origen tsunamític sense retreballament per tempestes (Cala Gat), de les que tenen un origen mixt amb perfils litorals baixos com ara Betlem, Mitjana i Mesquida. En el cas d'Aubarca, definir el grau de retreballament per tempestes és més complicat, tot i que és segur l'origen per tsunamis de una part dels seus blocs.

Referències

- Álvarez-Gómez, J. A., Olabarrieta, M., González, M., Otero, L., Carreño, E., 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., 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. 2006. *Tipus i evolució de les costes rocoses de Mallorca*. Tesi doctoral, inèdita. Departament de Ciències de la terra, Universitat de les Illes Balears 287 pp.
- Balaguer, P. 2012. Implicaciones de la Geomorfología en las Iniciativas de Gestión Integrada de la Zona Costera. In: Rodríguez-Perea, A., Pons, G. X., Roig-Munar, F. X., Martín-Prieto, J. A., Mir-Gual, M. i Cabrera, J. A. (Eds.). *La gestión integrada de playas y dunas: experiencias en Latinoamérica y Europa*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 19; 402 pp.
- Barbano, M. S., Pirrotta, C. i Gerardi, F. 2010. Large boulders along the south-eastern Ionian coast of Sicily: Storm or tsunami deposits? *Marine Geology*, 275: 140-154.
- 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* Büsum 28: 93-107.
- Biolchi, S., Furlani, S., Antonioli, F., Baldassini, N., Causon Deguara, J., Devoto, S., Di Stefano, A., Evans, J., Gambin, T., Gauci, R., Mastronuzzi, G., Monaco, C., i 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.
- Bishop, P. i Hughes, M. 1989. Imbricate and fitted fabrics in coastal boulder deposits on the Australian east coast. *Geology* 17: 544-547.
- Cañelles, B. 2010. *Long-term extreme wave height events in the Balearic Sea: characterization, variability and prediction*. Tesi doctoral, Universitat de les Illes Balears 71 pp.
- Cuerda, J., Vicens, D. i Gracia, F. 1991. Malacofauna y estratigrafía del Pleistoceno Superior marino de Son Real (Santa Margalida, Mallorca). *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 34: 99-108.

- Engel, M. i 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.
- Gómez-Pujol, L., Balaguer, P. i Fornós, J.J. 2007. El litoral de Mallorca: Síntesis Geomórfica. A: Fornós, J.J., Ginés, J. i Gómez-Pujol L. (Eds.) *Geomorfología Litoral: Migjorn y Llevant de Mallorca*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 15: 39-60.
- Goto, K., Miyagi, K., Kawamata, H. i Imamura, F. 2010. Discrimination of boulders deposited by tsunamis and storm waves at Ishigaki Island, Japan. *Marine Geology*, 269: 34-45.
- Goto K., Miyagi, K., Kawana, T., Takahashi, J. i Imamura, F. 2011. Emplacement and movement of boulders by known storm waves — field evidence from the Okinawa Islands, Japan. *Marine Geology* 283: 66-78.
- 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.
- <http://cedai.imedea.uib-csic.es> *Projecte Life Posidonia a escala 1:5.000*
- <http://www.costabalearsostenible.com>
- <http://www.ideib.caib.es>, *Infraestructura de Dades Espacials de les Illes Balears (IDEIB)*
- Jansà, A. 2013. Los ciclones mediterráneos y sus impactos en España. A: García-Legaz, C. i Valero, F. (Eds) *Fenómenos meteorológicos adversos en España*. AMV Ediciones, Madrid, 1:17-33.
- 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.
- 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. i Matheu, J. F. (Eds.). *Geomorfologia Litoral i Quarternari*, Homenatge al professor Vicenç M. Rosselló i Verger. Universitat de València, Spain, 215-222.
- Kelletat D. i Schellmann, G. 2002. Tsunami in Cyprus field evidences and 14C dating results. *Zeitschrift für Geomorphologie*, NF, Supplement band, 46 (1): 19-34.
- Maouche, S., Morhange, C. i 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. i Sanso, P. 2006. Boulder Fields: A Valuable Morphological Indicator of Paleotsunami in the Mediterranean Sea. *Zeitschrift für Geomorphologie*, NF Suppl.- Bd., 146: 173-194.
- Mastronuzzi i G. i Sanso, P. 2000. Boulders transport by catastrophic waves along the Ionian coast of Apulia (Southern Italy). *Marine Geology*, 170: 93-103.
- Mottershead, D.; Bray, M.; Soar, P.; Farres, P. J. 2014. Extreme wave events in the central Mediterranean: Geomorphic evidence of tsunami on the Maltese Islands. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 58 (3): 385-411.
- Mottershead, D.N. , Bray, M. J., Soar, P. J. i Farres, P.J. 2015. Characterisation of erosional features associated with tsunami terrains on rocky coasts of the Maltese islands. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40, 15, 2093-2111.
- May S. M., Willershauser, T. i Vött, A. 2010. Boulder transport by high-energy wave events at Cap Bon (NE Tunisia). In: Schwarzer, K., Schrottko, K. i Stattegger, K. (Eds.). *From Brazil to Thailand – New Results in Coastal Research. Coastline Reports*, 16: 1-10.
- Nandasena N. A. K., Paris, R. i Tanaka, N. 2011. Reassessment of hydrodynamic equations to initiate boulder transport by high energy events (storms, tsunamis). *Marine Geology*, 281:70-84.
- 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.

- Paris R., Wassmer, P., Sartohadi, J., Lavigne, F., Barthelemy, B., Desgages, E., Grancher, D., Baumert, P., Vautier, F., Brunstein, D. i Gómez, C. 2009. Tsunamis as geomorphic crises: lessons from the December 26, 2004 tsunami in Lhok Nga, West Banda Aceh (Sumatra, Indonesia). *Geomorphology*, 104: 59-72.
- Paris, R., Fournier, J., Poizot, E., Etienne, S., Morin, J., Lavigne, F. i Wassmer, P. 2010. Boulder and fine sediment transport and deposition by the 2004 tsunami in Lhok Nga (western Banda Aceh, Sumatra, Indonesia): a coupled offshore onshore model. *Marine Geology*, 268, 43-54.
- Paris, R., Naylor, L. i Stephenson, W. 2011. Boulders as a signature of storms on rock coasts. *Marine Geology*, 283: 1-11.
- Periáñez R. i 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. i Mastronuzzi, G. 2009. Evaluation of tsunami flooding using geomorphologic evidence. *Marine Geology*, 260: 6-18.
- Pignatelli C., Ferilli, S., Capolongo, D., Marsico, A., Milella, M., Pennetta, L., Piscitelli, A. i Mastronuzzi, G. 2010. Morphological evidences and computer science techniques in order to evaluate tsunami inundation limit. *Rivista Italiana di Telerilevamento*, 42: 129-142.
- Puertos del Estado* (www.puertos.es)
- 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. 2016. *Blocs de tempesta i tsunamis a les costes rocoses de les Illes Balears. Anàlisi geomorfològica i morfomètrica*. Tesi de doctoral. Facultat de Geologia. Universitat de Barcelona. 232 pp.
- Roig-Munar F. X., Rodríguez-Perea, A., Martín-Prieto, J. A., Vilaplana, J. M., Gelabert, B., Pons, G. X. i Mir-Gual, M. 2014. Morfometría de bloques de tsunami en las costas rocosas del sur de Mallorca (I. Baleares). In: 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.109-102. 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). In: Málvarez, G. et al. (Eds.), VIII Jornadas de Geomorfología litoral, *Revista Geo-Temas*, 15: 229-232.
- Scheffers, A. 2004. Tsunami imprints on the Leeward Netherlands Antilles (Aruba, Curacao and Bonaire) and their relation to other coastal problems. *Quat. Int.*, 120: 163-172.
- Scheffers A., Kelletat, D. i Browne, T. 2008. Wave-emplaced coarse debris and megaclasts in Ireland and Scotland: a contribution to the question of boulder transport in the littoral environment, *GIS Coast Research Publication*, 6: 151-153.
- Shefers A. i Kelletat, D. 2003. Sedimentologic and geomorphic tsunami imprints worldwide - a review. *Earth-Science Review*, 63: 83-92.
- Scheffers A. M. i Kinis, S. 2014. Stable imbrication and delicate/unstable settings in coastal boulder deposits: Indicators for tsunami dislocation?. *Quaternary International*, 332: 73-84.
- Scheffers A. i Scheffers, S. 2006. Documentation of Hurricane Ivan on the Coastline of Bonaire. *Journal of Coastal Research*, 22: 1437-1450.
- Scheffers, A. i Scheffers, S. R. 2007. Tsunami deposits on the coastline of West Crete (Greece). *Earth and Planetary Science Letters*, 259 (3-4): 613-624.
- Scicchitano G., Monaco, C. i Tortorici, L. 2007. Large Boulder deposits by tsunami along the Ionian coast of south-eastern Sicily (Italy). *Marine Geology*, 238: 75-91.
- Silva P. i Rodríguez Pascua, J. 2014. *Catálogo de los efectos geológicos de los terremotos*

en España. Instituto Geológico y Minero de España, 358 pp.

- Suañez S., Fichaut, B. i Magne, R. 2009. Cliff-top storm deposits on Banneg Island, Brittany, France: Effects of giant waves in the Eastern Atlantic Ocean. *Sedimentary Geology*, 220: 12-28.
- Vött A., May, M., Brückner, H. i Brockmüller, S. 2006. Sedimentary evidence of late Holocene tsunami events near Lefkada Island (NW Greece). *Zeitschrift für Geomorphologie N.F. Suppl.*, 146: 139-172.
- Wang X. i Liu, P. L. F. 2005. A numerical investigation of Boumerdes-Zemmouri (Algeria) earthquake and tsunami. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 10: 171-183.