

# Presència de blocs de tsunamis i tempestes a les costes rocoses de la serra d'Irta (el Baix Maestrat, País Valencià)

Francesc Xavier Roig-Munar<sup>1</sup>, Enric Forner<sup>2</sup>, José Ángel Martín-Prieto<sup>1,3</sup>, Joaquín Segura<sup>2</sup>, Antonio Rodríguez-Perea<sup>3</sup>, Bernardí Gelabert<sup>4</sup> & Joan Manel Vilaplana<sup>5</sup>

1. Consultor ambiental. Carrer Carrixaret 18-6, 07749, es Migjorn Gran, Menorca; xiscoreig@gmail.com

2. Ateneu de Natura. Sant Roc, 125 3r 5a 12004 Castelló de la Plana. e-mail: fornervalls@gmail.com

3. Departament de Geografia Universitat de les Illes Balears. 07122 Palma.

4. Departament de Biologia. Universitat de les Illes Balears. 07122 Palma.

5. Departament of Earth and Ocean Dynamics, RISKINAT Group; Geomodels; Universitat de Barcelona, Martí i Franqués, s/n 08028 Barcelona. nue.vilaplana@ub.edu

La costa de la península Ibèrica té pocs registres d'esdeveniments d'onatge extrem, tsunamis o tempestes. En aquest treball es presenta l'estudi morfològic de diferents cordons litorals de blocs al llarg de les costes rocoses de la serra d'Irta (País Valencià). L'estudi ha localitzat sis ubicacions amb blocs d'un pes de 1.5 T de mitjana, que es troben a una distància mitjana de la línia de costa de 15.5 m i a una alçada mitjana de 2.3 m sobre el nivell de la mar. Es defineixen les àrees d'arrencada dels blocs, els seus patrons d'imbricació i una adreça predominant cap al 119.5°, coincident amb les direccions dels tsunamis procedents d'Algèria. A cada bloc se li apliquen les equacions de Nott i d'Engel & May per calcular les altures d'onada de tsunamis i tempestes capaços de generar aquests dipòsits, obtenint els valors de sobre elevació (run-up) per remoure cada bloc.

*Paraules clau: Costa rocosa, morfometria, blocs, tsunamis, serra d'Irta, Castelló.*

## Presence of tsunamis and storms boulders on the rocky shores of the Irta mountain range (el Baix Maestrat; País Valencià; Spain)

The coast of the Iberian Peninsula has few records of extreme wave events, storms or tsunamis. In this work we present the morphometric study of some boulder ridges along the rocky coasts of the Irta mountain range (Valencian Country, East of Spain). The study has located six settings with boulders weighting 1.5 T in average, at an average distance from the coast line of 15.5 m and 2.3 m a.s.l. Boulder quarrying areas have been identified, as well as their imbricate pattern, which is oriented to 119.5°. That is coincident with the directions of the tsunamis coming from Algeria. The equations of Nott and Engel & May have been applied to each block to calculate the run-up of tsunamis or storms capable of generating these deposits.

*Keywords: rocky shores, morphometry, boulders, tsunamis, Irta mountain range, Castelló.*

## Introducció

Les costes rocoses poden actuar com a entorns de deposició per a una àmplia gamma de mides de sediments des d'arena fina fins a blocs (Trenhaile 2005). Hi ha l'evidència creixent que les costes rocoses són també sensibles a esdeveniments d'alta energia, com tempestes (Suàñez et al., 2009), huracans, tifons o ciclons (Scheffers & Scheffers, 2006) i tsunamis (Goto et al., 2007). Un dels principals efectes dels tsunamis a les costes rocoses està representat per la presència de blocs de grans dimensions arrencats i desplaçats

terra endins pel flux generat per la sobrelevació conseqüent (Pignatelli et al., 2010; Engel & May, 2012). Fins fa poc hi havia escassos exemples documentats de blocs clarament desplaçats per tsunamis històrics (Goff et al., 2006; Paris et al., 2009) i les seves interpretacions i orígens van ser molt controvertits, ja que les diferències sedimentàries entre tsunamis i tempestes eren mal interpretades, sense establir criteris definitius per a la seva diferenciació, especialment a les costes baixes, on els blocs poden tenir un origen poli-gènic associat a tempestes i/o tsunamis (Hall, 2011).

La identificació dels blocs transportats per tsunamis i/o per tempestes és important per al reconeixement de l'ocurrència d'esdeveniments produïts en el passat (Nott, 2003), així com per a estimar les propietats hidràuliques que han donat lloc a aquests sediments (Imamura et al., 2008). La distinció entre ells es basa en un conjunt de criteris sedimentològics, morfològics, cronològics, estratigràfics i d'organització que cal analitzar detalladament en cada àrea estudiada (Roig-Munar, 2016). Goto et al. (2011) van indicar que la mesura dels blocs i les seves distribucions espacials pot ser utilitzada per estimar les velocitats dels fluxos d'onada generada per tempestes o tsunamis. Segons Browne (2011), Weiss (2012), Scheffers & Kinis (2014) i Roig-Munar et al. (2017c) els dipòsits de blocs imbricats i alineats al llarg de la costa, ja sigui en un sol cordó o en diversos cordons superposats, són clars indicadors de transport associat a tsunamis. En l'última dècada, el debat sobre el transport de blocs per discernir el seu origen entre tsunamis versus tempestes ha obligat a considerar amb més detall el paper de les tempestes sobre les costes rocoses (Etienne & París, 2010; Roig-Munar et al., 2017b). En aquest sentit, s'han desenvolupat equacions que permeten estimar les alçades d'ona necessàries per a transportar un bloc sota tres supòsits: blocs submergits, blocs subaeris i blocs delimitats per juntes o fractures (Nott, 2003; Barbano et al., 2010, Pignatelli et al., 2010; Engel & May, 2012).

A la Mediterrània, s'han realitzat estudis de blocs de grans dimensions al sud d'Itàlia (Barbano et al., 2010), a Grècia (Scheffers i Scheffers 2007), a Egipte (Dalal i Torab, 2013), a Algèria (Maouche et al., 2009) i a Malta (Biolchi et al., 2015), i foren recollits a una cartografia per Mastronuzzi (2010) i posteriorment per Furlani et al. (2015) que l'amplià i l'actualitzà. A les costes rocoses del Mediterrani occidental, també s'han analitzat blocs a les costes de França (Shah-Hosseini et al., 2013) i a les illes Balears, on Scheffers & Kelletat (2003), i Kelletat et al. (2005) van analitzar blocs de tsunami a Mallorca. Posteriorment Roig-Munar et al. (2014, 2015, 2016, 2017a, 2018a) els van ampliar a tot l'arxipèlag, associant-los a diferents fonts tsunamíques que impacten a les illes Balears (Roger & Hébert, 2008; Álvarez-Gómez et al. 2010, 2011). L'estudi de blocs de tsunami a les costes de la península Ibèrica es

circumscriuen als estudis realitzats a les costes de Trafalgar (Càdiz), realitzats per Whelan y Kelletat (2003; 2005) i per Gracia et al. (2006); i a les costes rocoses de Múrcia, a la zona de cabo Cope (Lario et al., 2017). La presència de blocs associats a tsunamis al País Valencià ha estat estudiada, en una primera aproximació, en dos indrets de la serra d'Irta, on s'ha evaluat la morfometria de blocs (Roig-Munar et al., 2018b). La geomorfologia de la costa de la serra d'Irta ha estat molt escassament tractada, amb l'única excepció de Mateu (1982). Aquest autor, l'únic que va reparar en l'existència de camps de blocs de grans dimensions i d'aparença caòtica, no els va interpretar com originats per tsunamis sinó pel transports dels barrancs, que eren d'origen continental: "Las grandes dimensiones de algunos bloques (más de 1.5 m de diámetro) sugieren, junto con el aspecto caótico de la orientación de los cantos, un medio de transporte caracterizado por *debris flows* (colada de derrubios)" (Mateu, 1982: 184).

### **Marc geogràfic i geològic**

L'àrea estudiada es troba al llevant de la península Ibèrica, a la comarca del Baix Maestrat (Fig. 1), constitueix el litoral que va des del poblat mariner d'Alcossebre, que forma part del municipi d'Alcalà de Xivert, fins a Peníscola. És la façana costanera de la serra d'Irta, i quasi la totalitat de la superfície explorada, excepte l'extrem de migjorn, queda dins de l'àmbit territorial classificat com a parc natural de la Serra d'Irta (Decret 108/2002). Aquesta part del litoral, de costa rocallosa, no està tan intensament urbanitzada com la resta del País Valencià i permet l'estudi de les estructures objecte d'aquest treball.

La serra d'Irta presenta una orientació catalànide (NE-SO), que s'allarga paral·lela a la línia de costa. A tramuntana, pren contacte amb la mar en penya-segats de considerable alçada (zona de torre Badum; Fig. 2A), i de la qual l'illot de Peníscola és l'últim contrafort, on la deriva nord-sud dels corrents marins de la zona (Gili, 2001) i els sediments de l'Ebre van generar el conegut tòmbol arenós. Atesa l'alçada dels cingles en aquesta zona, no es poden generar estructures de blocs elevats, objecte d'estudi d'aquest treball. A migjorn, la serra d'Irta està lleugerament retirada de la línia de costa, configurant unes terrasses planes de dimensions reduïdes, "plans" en la terminologia

local (pla de Veleta, pla de Roda, pla de la Basseta), que s'estenen entre els pendents abruptes de la serra i la vora de la mar, que serà la zona estudiada. Mateu (1982: 182, fig. 5.24) la defineix com: "acera aluvial adosada al pie del frente costero de la Serra Grossa d'Irta (sic)". A ponent, la serra d'Irta tanca la vall d'Alcalà, que s'eixampla entre aquesta i la serra de les Talaies, que comparteixen la mateixa orientació catalànide i es constitueix en el corredor natural pel qual transiten totes les vies de comunicació. A nord i sud de la serra d'Irta, la línia de costa és baixa, amb cordons litorals, d'arena o grava, que tanquen antigues albuferes actualment reblertes: la marjal de Peníscola i el Prat de Cabanes-Torreblanca.

Des d'un punt de vista geològic, la serra d'Irta està constituïda, bàsicament, per materials calcaris

juràssics que van del Pliensbaquià al Kimmeridgià, amb algun aflorament cretaci (IGME, 1973; Forner i Brewster, 2013). Allí on la serra està un poc retirada de la mar, perquè se suavitza el pendent, sobre les calcàries juràssiques i discordant amb l'angle (Fig. 2A), s'ha dipositat un conglomerat quaternari per transport dels barrancs que drenen la vessant de llevant de la serra, que són de fort pendent, ja que la màxima alçada de la serra, que és de 571 m, s'assoleix al pic Campanilles, que es troba només a 4 Km en línia recta de la mar. Aquests sediments configuren cons de dejecció, cartografiats per l'IGME (1973), i apreciables directament a les fotografies del vol aeri del 1956 (Forner & Brewster, 2013). El conglomerat quaternari, ben consolidat, té una composició heterogènia de còdols calcaris, bastant arrodonits per la curta trajectòria del desplaçament i classificats per



**FIGURA 1.** Àrea d'estudi amb els sis punts estudiats amb la rosa de la direcció de l'onatge i les roses de direccions dels blocs de cadascuna de les zones analitzades. Fonts: [www.puertos.es](http://www.puertos.es) (consultada el mes de juny de 2018) i <http://www.idev.gva.es> (consultada el mes de juny de 2018)

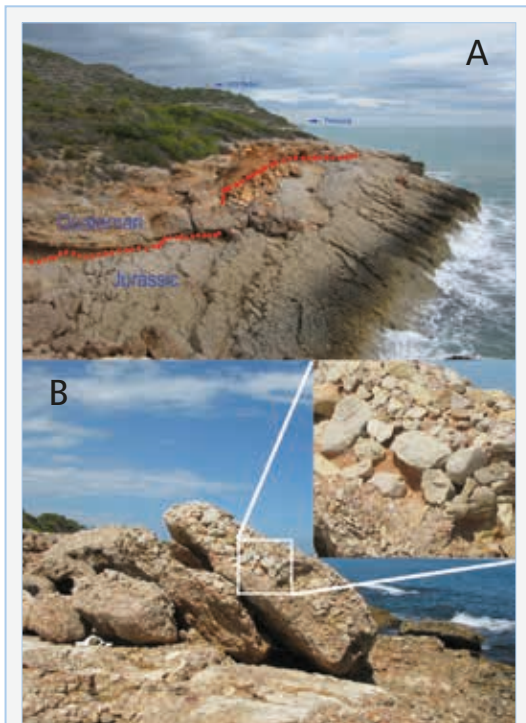
Area of study with the six points studied and with the rose of the directions of the boulders of each one of the analysed areas. Source: [www.puertos.es](http://www.puertos.es) and <http://www.idev.gva.es>

grandària en nivells no ordenats, que no segueixen seqüències creixents o decreixents sinó aleatòries, probablement en funció de la intensitat de les barrancades que els van transportar, les quals estan directament lligades a la intensitat dels aiguats que les van generar; en la composició hi ha quantitats importants d'argiles roges (Fig. 2B). Tant la proporció entre argiles i còdols com la mida d'aquests últims és molt variable.

Aquest material, que es denomina *taparàs* a la comarca, constitueix les terrasses rocoses de l'àrea d'estudi (Fig. 1) i presenta diferents graons atribuïbles al desmantellament progressiu de la línia de costa sotmesa a diferents esdeveniments extraordinaris, tempestes i/o tsunamis, i a la presència de fractures que faciliten la seva erosió en forma de blocs arrabassats (Roig-Munar et al., 2015). Aquests

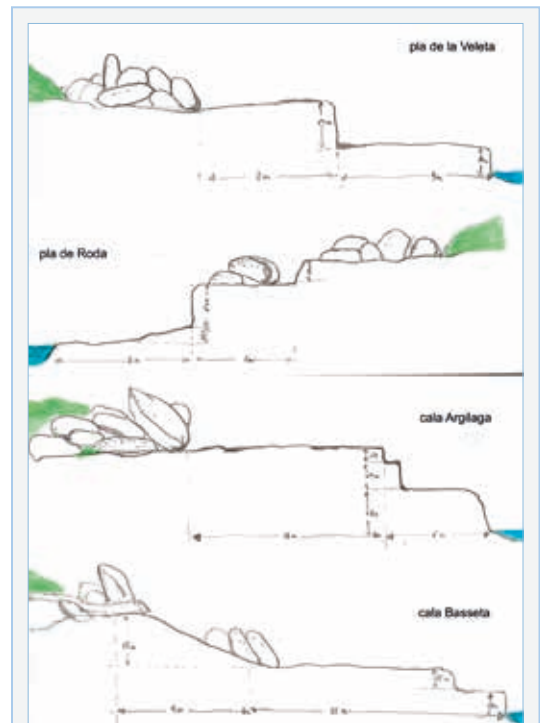
perfils (Fig. 3) presenten diversos graons terra endins d'entre 0.5 i 2 m s.n.m. sobre els quals bat l'onatge i on es poden identificar sediments de mida gran en forma de blocs de dimensions notables i amb disposicions imbricades. Les tipologies d'aquests penya-segats on es troben els camps de blocs es consideren de perfil baix, amb alçaries mitjanes de 2.5 m corresponen, segons la classificació de Balaguer (2012), a penya-segats de costes rocoses amb presència de blocs (Fig. 3) i a un tipus de perfil on es poden donar processos poligènics de tempesta i tsunami, segons Roig-Munar (2016).

Cada àrea analitzada (Fig. 1) presenta unes característiques geomorfològiques definides que condiciona la presència i disposició dels blocs analitzats (Fig. 4A i 4B). No obstant això, totes elles presenten un patró comú: la presència de blocs de grans dimensions



**FIGURA 2.** A: detall del contacte entre el Juràssic i el Quaternari; B: blocs del pla de Roda amb detall del conglomerat quaternari.

A: detail of the contact between Jurassic and Quaternary; B: boulders of the pla de la Roda with detail of the agglomerate.



**FIGURA 3.** Esquemes topogràfics dels perfils d'alguns dels emplaçaments senyalats en la Fig. 1 on es troben els blocs estudiats.

Topographic schemes the profiles of some of the locations indicated in Fig. 1 where are the studied boulders.

amb morfologies de cordons o d'agrupacions de blocs imbricats i ubicats sobre penya-segats o rampes litorals (Fig. 3). En totes elles hem de descartar el seu emplaçament per processos gravitacionals ja que no existeix cap escarpament proper que els pugui originar, ni processos d'erosions diferencials. Totes les àrees presenten morfologies pre i post-deposicionals de cocons sobre els blocs.

Els camps de blocs queden emmarcats, a la part de terra, per un cordó vegetal espès que corre paral·lel a la línia de costa, modelat per l'espri salí, amb la típica forma triangular de perfil que li ofereix protecció a la vegetació posterior contra les microgotetes salines. Aquest cordó està conformat per pi blanc (*Pinus halepensis*, Miller), margalló (*Chamaerops humilis* Linné), matissa (*Pistacea lentiscus* L.) i ullastre (*Olea europaea* L.), d'una alçada entre 1.5 i 5 m (Fig. 4A, 4B). No es pot saber, amb certesa, si aquest cordó

vegetal va constituir un fre final per als blocs aixecats per tsunamis o tempestes. S'ha constatat, però, que en l'espai que ocupa el cordó vegetal i més enllà terra endins, no existeix cap bloc de dimensions grans o mitjanes sospitós de ser transportat des de la mar en cap de les sis zones estudiades.

**Clima marítim**

La conca mediterrània es caracteritza per una costa molt retallada amb petites subconques ben definides, on l'energia de l'onatge està condicionada per la velocitat del vent i per un *fetch* limitat (Lionello & Sanna, 2005), i on s'han identificat ciclons gairebé tropicals denominats medicanes (Fita et al., 2007). A la Mediterrània occidental, els onatges més intensos procedeixen del NE (Sotillo et al., 2005), encara que els temporals del NO també generen forts onatges entre Balears, Còrsega i Sardenya (Bertotti & Cavaleri, 2008).



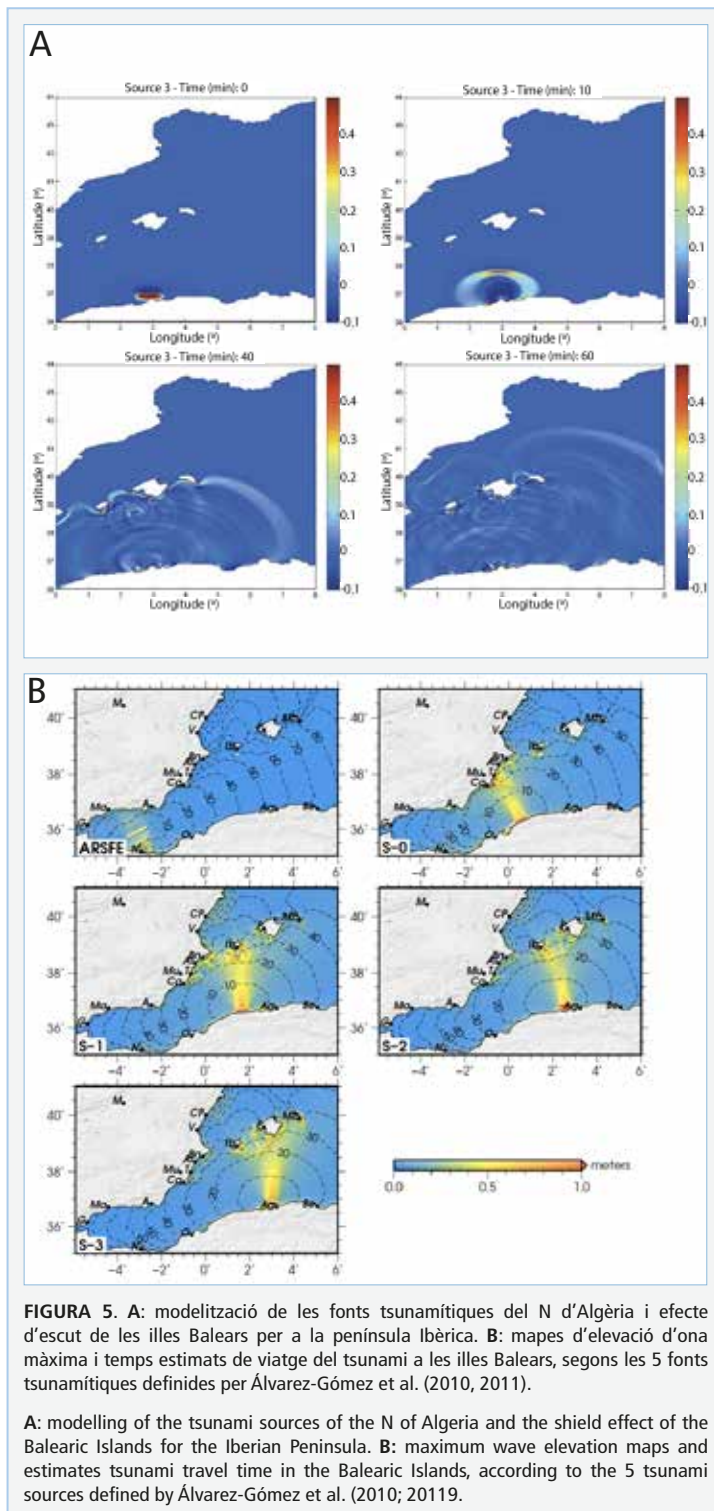
**FIGURA 4A.** A: blocs del pla de la Roda; B: blocs de la cala Argilaga.

A: boulders of the pla de Roda; B: boulders of the cala Argilaga.



**FIGURA 4B.** A: blocs de la cala Basseta; B: blocs de la cala Argilaga.

A: boulders of the cala Basseta. B: boulders of the cala Argilaga.



La costa de la zona d'estudi (Fig. 1) s'orienta de NNE a SSO, sent el *fetch* més llarg el que s'estén cap al NE amb 700 km, i està oberta a l'E amb 600 km i a l'ESE amb 180 km. La mitjana del règim mareal s'ha obtingut a partir de les dades del mareògraf del Port de Sagunt ([www.puertos.es](http://www.puertos.es)), i el resultat mostra que en el 86% de les observacions el rang mareal oscil·la entre 10 i 20 cm, per la qual cosa es considera la zona d'estudi com micromareal. Per analitzar el règim de l'onatge a la zona, s'han avaluat les dades REDTEX (mesures procedents de la xarxa de boies d'aigües profundes) del Punt SIMAR 2.088.123, al llarg del període comprès entre l'any 1958 i l'any 2017, i amb una fiabilitat del 99.68%. Aquestes dades permeten reconstruir el vent i l'onatge del passat a partir de sèries històriques tractades mitjançant models numèrics WAM per estimar les condicions de vent i onatge pretèrites.

L'anàlisi de l'onatge de més energia mostra que la principal direcció correspon al segon quadrant, principalment de component E, amb una freqüència del 23% i, en segon lloc, de l'onatge procedent del SE i ESE, al voltant del 18% per a cadascun d'ells (Fig. 1). Pel que fa a l'altura d'ona significativament ( $H_s$ ), tan sols el 0.039% de les ocasions supera els 3 m d'alçada, sent l'onatge més representatiu l'inferior a 1 m, al 95% del total del període analitzat. L'onatge màxim registrat és de 3.76 m, amb un  $T_p$  de 11.36 segons el dia 15 de novembre de 2001, on la component va ser de

108. Pel que fa al període pic ( $T_p$ ), el 79.15% és inferior a 6 s. si tan sols el 3.29% supera els 10 s.

### **Modelització de tsunamis**

Álvarez-Gómez et al. (2010, 2011) van modelitzar els tsunamis generats en fonts pròximes a la península Ibèrica i a les illes Balears amb l'objectiu d'identificar àrees de risc i zones d'impacte dels fluxos de tsunami (Fig. 5a i 5b). Els resultats obtinguts mostraren mapes d'elevacions d'onada màxima de 2 m i estimacions del temps de viatge de l'ona del tsunami, a partir de nou fonts sísmiques entre les quals es trobaven les dels terratrèmols de Al-Asnam de l'any 1980 i de Boummerdes-Zemmouri de l'any 2003. Aquestes estimacions de temps de viatge coincideixen amb els models de Roger & Hébert (2008) i de Sahal et al. (2009). Totes les modelitzacions realitzades (Fig. 5) impacten a les àrees de les Balears, on s'han analitzat morfològicament blocs de tsunamis associats a aquestes trajectòries (Roig-Munar, 2016). En el cas de la costa de Castelló, les fonts tsunàmiques que hi afecten corresponen a les fonts S-1 i S-2 definides per Álvarez-Gómez et al. (2011), i que poden ser les responsables dels fluxos que afecten les seves costes amb elevacions superiors a 2 m s.n.m. Les estimacions d'arribada d'aquestes ones a les costes de Castelló es troben entre 60' i 90' (Sahal et al., 2009), a través del pas del flux entre les illes d'Eivissa i Mallorca o bé entre les trajectòries provinents del Mar d'Alborà.

### **Hipòtesi i objectius**

El treball parteix de la hipòtesi que els fluxos de tsunami modelitzats a la Mediterrània occidental (Roger & Hébert, 2008; Sahal et al., 2009; Álvarez et al., 2010, 2011; Periañez & Abril., 2013), a més de deixar testimonis sedimentaris en forma de grans blocs arrabassats a les costes rocoses de les illes Balears (Roig-Munar, 2016), també haurien d'estar representats a d'altres indrets, i també a la costa peninsular, com ara al litoral de la província de Castelló, amb presència de blocs associats als tsunamis provinents d'Algèria i que no hagin estat destruïts pel procés urbanitzador.

L'objectiu d'aquest treball és la caracterització geomorfològica i morfològica de 68 blocs situats a 6 àrees d'estudi (Fig. 1) sobre penya-segats i terrasses litorals de la serra d'Irta (Fig. 3). Aquests blocs varen

ser prèviament descrits per Mateu (1982) com a blocs corresponents a esllavissades associades a cons de dejecció en direcció terra-mar i que quedaren aïllats sobre les terrasses litorals. Amb aquesta caracterització i l'aplicació de la metodologia, es pretén discernir l'origen d'aquests camps de blocs.

### **Mètode**

La metodologia ha consistit en la mesura i observació de diferents paràmetres a cadascuna de les 6 àrees analitzades mitjançant l'anàlisi morfològica i l'aplicació d'equacions hidrodinàmiques. La metodologia ha seguit les següents fases:

1. Caracterització morfològica de blocs. De cada bloc s'han obtingut els valors d'eix llarg (A), d'eix intermedi (B) i de l'eix curt (C) en metres. Per tal de determinar el volum més fiable, i al ser aquestes dades una simplificació del volum del bloc, s'han aplicat els resultats de triangulació de blocs obtinguts a les illes Balears, obtenint un volum més aproximat al real. Per això, s'ha reduït un 38% el producte dels seus eixos, ajustant-se així a la realitat de les morfologies naturals (Roig-Munar et al., 2015).
2. De cada bloc, s'han obtingut valors de la seva orientació i capbussament, en graus, així com la seva cota i la distància a la línia de costa, en metres, 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: conglomerats calcaris quaternaris.
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 com notch i/o cocons i post-deposicionals, com indicadors de la posició inicial i final dels blocs, així com de les superfícies d'abració corresponents als blocs desmantellats.

6. S'han aplicat a cada bloc les equacions matemàtiques de Nott (2003), modificades per Barbano et al. (2010), i les equacions d'Engel & May (2012), per tal de calcular els valors hidrodinàmics necessaris per l'arrabassament, desplaçament i deposició dels blocs sota diferents supòsits: bloc submergit (Nott, 2003; Barbano et al., 2010), bloc subaeri i bloc delimitat per fractures (Engel & May, 2012). Al valor de les equacions, se'ls han afegit els valors de l'altura del blocs s.n.m. per calcular la sobre-elevació o Run-up (Roig-Munar et al., 2017a; Zhao et al., 2017). Amb això, s'ha obtingut una estimació de la columna d'aigua necessària per a l'arrencada i/o el desplaçament dels blocs fins a la seva posició actual, establint 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 & Kelletat (2003) per establir les relacions qualitatives entre tsunami i tempesta.

Les equacions aplicades són les següents:

a) Equació de Nott (2003) modificada per Barbano et al. (2010): calcula els valors hidrodinàmics necessaris per l'arrabassament i desplaçament de blocs

sota diferents supòsits. En aquest treball sols s'utilitzen les equacions en el cas dels blocs submergits:

$$1. H_t = [0,25(\rho_s - \rho_w / \rho_w) 2a] / [(C_d (ac/b^2) + C_l)]$$

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

On  $H_t$  i  $H_s$  són les alçades d'onada trencant necessàries per treure els blocs submergits en un escenari de tsunami ( $H_t$ ) i de tempesta ( $H_s$ );  $\rho_s$  i  $\rho_w$  són les densitats del bloc i de l'aigua;  $a$  és l'eix llarg,  $b$  és l'eix mig del bloc i  $c$  el eix curt.  $C_l$  i  $C_m$  són coeficients empírics d'elevació i massa,  $C_d$  és el coeficient d'arrossegament.

b) Equació d'Engel & May (2012): els 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. 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'ona d'arribada.

2. Blocs delimitats per fractures:

$$H_t = (\rho_b - \rho_w) \cdot V \cdot (\cos \theta + \mu \cdot \sin \theta) / 2 \cdot \rho_w \cdot CL \cdot a \cdot b \cdot q$$

$$H_s = (\rho_b - \rho_w) \cdot V \cdot (\cos \theta + \mu \cdot \sin \theta) / 0.5 \cdot \rho_w \cdot CL \cdot a \cdot b \cdot q$$

3. Blocs subaeris:

Àrea	N	A	B	C	Alç	Dist	Ori.	Incl.	Pes	TF
pla de Veleta	22	1.5	1.05	0.3	2.4	13.4	110	69	0.8	26.9
pla de Roda	6	2	1.1	0.5	2.8	15	118	40.8	2.3	73.7
cala Argilaga	13	2	1.4	0.5	2.6	14.9	135	71	2.7	101.5
pla de Basseta	10	1.9	1.4	0.3	2.79	20.2	129	39	1.7	90.2
cala Basseta	9	1.7	1.2	0.3	1.5	12.9	110	24	1.1	20.6
cala d'Irta	8	1.3	1	0.5	3.5	18.6	115	33.7	1.1	65.7
<b>Mitjanes</b>	<b>68</b>	<b>1.7</b>	<b>1.2</b>	<b>0.4</b>	<b>2.6</b>	<b>15.5</b>	<b>119.5</b>	<b>52.9</b>	<b>1.6</b>	<b>58.38</b>

**TAULA 1.** Dades de la morfometria, mitjanes dels blocs per a cadascuna de les àrees analitzades. **N:** nombre de blocs; **A, B i C:** eixos llarg, mig i curt, respectivament; **Alç:** alçada sobre el nivell de la mar; **Dist:** distància a la mar; **Ori:** orientació dels blocs; **Incl:** inclinació dels blocs; **TF:** Transport Figure.

Data of the morphometry, averages of the boulders for each one of the areas analysed. **N:** number of boulders; **A, B and C:** long, medium and short axes, respectively; **Alç:** height above sea level; **Dist:** distance to the sea; **Ori:** orientation of the boulders; **TF:** Transport Figure.



$$H_t = 0.5 \cdot \mu \cdot V \cdot \rho_b / CD \cdot (a \cdot c \cdot q) \cdot \rho_w$$

$$H_s = 2 \cdot \mu \cdot V \cdot \rho_b / CD \cdot (a \cdot c \cdot q) \cdot \rho_w$$

On  $H_t$  és l'altura de l'ona de tsunami,  $H_s$  és l'altura de l'ona de temporal,  $V$  el volum del bloc,  $\rho_b$  el pendent de la base dels blocs,  $\rho_w$  el coeficient de fricció (estimat en 0.65),  $CL$  el coeficient de sustentació (estimat en 0.178) i  $q$  un coeficient d'àrea del bloc (valorat en 0.73) i on  $CD$  és el coeficient d'arrossegament (estimat en 1.95).

c) Finalment, s'ha utilitzat la fórmula de Scheffers & Kelletat (2003) denominada *Transport Figure* (TF): es tracta d'una equació simple que consisteix en la multiplicació del pes del bloc ( $P$ ) en tones ( $T$ ), 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 on, segons els seus creadors, els valors superiors a 250 de *Transport Figure* (TF) es consideren blocs transportats per tsunamis.

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

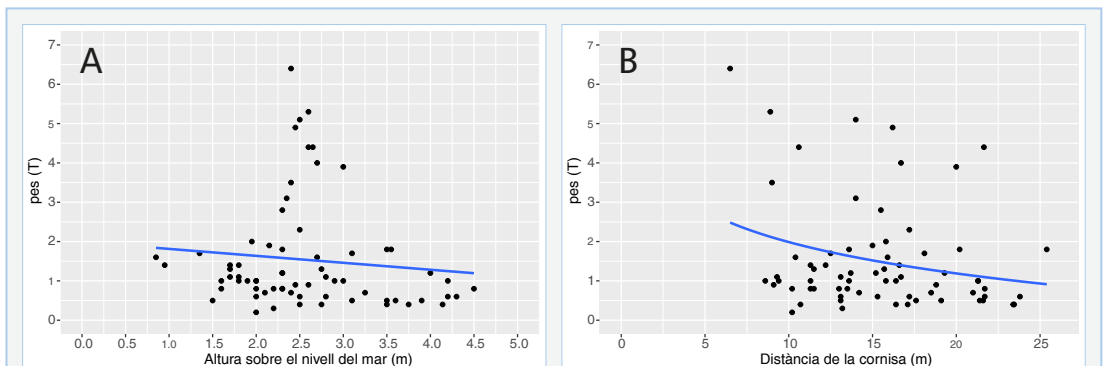
Es tracta d'una fórmula poc utilitzada en l'estudi de la hidrodinàmica dels blocs, tot i que és una aproximació a l'energia necessària per al transport de cada bloc. Segons Scheffers & Kelletat (2003), en aplicar-la

a Mallorca, els valors de TF fins a 230 són blocs transportats per l'onatge de tempesta, mentre que un TF superior a 250 és el resultat del transport per tsunamis. Cal fer esment que els autors no aplicaren la reducció dels volums dels blocs ni analitzaren en detall les característiques geològiques i geomorfològiques de l'àrea analitzada. Segons Roig-Munar et al. (2016) els valors inferiors a 250 poden ser interpretables a escala local.

**Resultats i interpretació**

Els resultats obtinguts a partir de la caracterització dels blocs, de l'anàlisi dels tipus de perfils on es troben, juntament amb la consideració del règim d'onatge dominant (Fig. 1), de les trajectòries de tsunamis que afecten la costa (Fig. 5) i de les dades morfològiques de cada àrea, permeten tenir una visió més detallada dels diferents processos que hi han actuat i relacionar-los amb les forces hidràuliques produïdes per diferents fluxos sobre els penya-segats analitzats (Fig. 3) obtenint així un patró de la sedimentació dels blocs (Fig. 4A i 4B). Els factors considerats a l'hora de l'anàlisi d'aquests blocs han estat:

1. Les densitats dels blocs. Aquestes són decisives per inferir les alçades mínimes requerides pels diferents fluxos que els han moguts i establir dades més realistes de l'altura d'ona per tal de distingir entre tsunamis i tempestes (Spiske et al., 2010). S'han mesurat



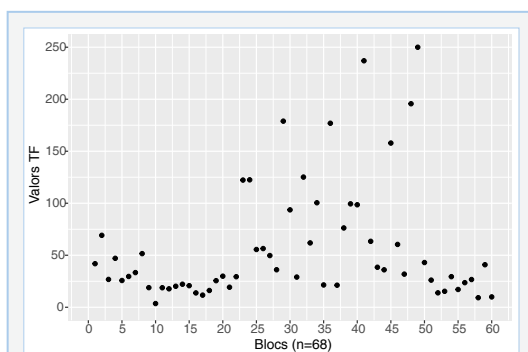
**FIGURA 6. A:** distribució de blocs en funció de la alçada sobre el nivell de la mar i el pes. **B:** distribució de blocs en funció de la distància a la costa i el pes.

**A:** distribution of boulders based on height above sea level and weight. **B:** distribution of boulders based on the distance to the cost and the weight.

les densitats de 4 blocs a tres àrees d'estudi, obtenint una densitat mitjana de 2.51, que és aplicada a les equacions matemàtiques (equacions 1, 2 i 3).

2. La caracterització morfològica dels blocs. Aquesta es basa en la mesura directa del volum del bloc ( $A*B*C$ ), amb l'ajust d'aquest mitjançant la triangulació (Roig-Munar et al., 2015), obtenint un valor mitjà del 62% del volum inicial mesurat amb els tres eixos simples. També s'han mesurat les distàncies des de la línia de costa fins al bloc, la seva alçada s.n.m i el seu pes. A la Taula 1 es poden observar els valors mitjans dels eixos dels blocs a cadascuna de les sis unitats analitzades i les mitjanes del conjunt. La mitjana de les mesures dels eixos A, B i C dels 68 blocs són d'1.7, d'1.2 i de 0.4 m, respectivament. Aquests valors són coincidents amb les potències denudades que podem observar als perfils de la Fig. 3 i als detalls dels blocs de les Fig. 4A i 4B. L'alçada mitjana on es troben els blocs és de 2.6 m s.n.m, i és la cala d'Irta la que presenta els blocs més elevats, a 3.5 m. Els blocs es troben a una distància mitjana de la línia de costa de 15.5 m, i trobem les distàncies majors a la zona del pla de Basseta i la cala d'Irta. Els blocs presenten una orientació mitjana de  $119.5^\circ$  i una imbricació en les formes de cordons o agrupacions de  $52.9^\circ$ , amb les majors inclinacions al pla de Veleta ( $69^\circ$ ).

La mitjana del pes dels blocs és d'1.6 T i trobem els majors valors (2.7 i 2.3) al pla de Veleta i al pla de Roda respectivament. Els valors de la Taula 1,



**FIGURA 7.** Representació dels valors del Transport Figure a les 6 zones analitzades.

Representation of the values of Transport Figure in the 6 zones analysed.

juntament amb les diferents observacions morfològiques (Fig. 3, 4A i 4B), permeten, de forma qualitativa, fer una aproximació per relacionar els blocs amb els processos que han ajudat al seu arrabassament, desplaçament i deposició (Barbano et al., 2010; Goto et al., 2011), ja que presenten uns patrons morfològics associats a fluxos de gran energia com demostren els graus d'imbricació (Scheffers & Kinis, 2014; Roig-Munar et al., 2015), que conjuntament amb l'aplicació de les equacions i la relació amb les modelitzacions de trajectòries de tsunamis, els perfils de l'àrea, l'anàlisi morfològica dels blocs i l'onatge, permeten contextualitzar millor cada una de les 6 àrees estudiades.

A la Fig. 6A i a la 6B es representa la distribució dels blocs analitzats en funció del seu pes i de la seva alçada sobre el nivell del mar, i en funció del seu pes i la seva distància a la costa. S'observa a la Fig. 6A que la major concentració de blocs se situa entre dues franges d'alçades dominants, una primera entre els 1.5 i 2.8 m, amb una forta concentració amb valors mitjans d'1.1 T de pes, i amb alguns blocs que superen les mitjanes de pes superiors a les 4 T, representades amb un núvol de punts sobre la concentració major. Una segona concentració de blocs es troba entre els 3.5 i 4.5 m s.n.m amb pesos mitjans de 0.8 T. Pel que fa a la distància dels blocs de la línia de costa (Fig. 6B), també podem observar una agrupació de blocs dominants entre els 10 m i els 22 m amb uns pesos mitjans de 1.2 T. Observem un núvol de punts dispersos paral·lel a la major concentració i que presenten valors mitjans de 4.1 T i distribuïts entre els 8 i 22 m de distància de la cornisa.

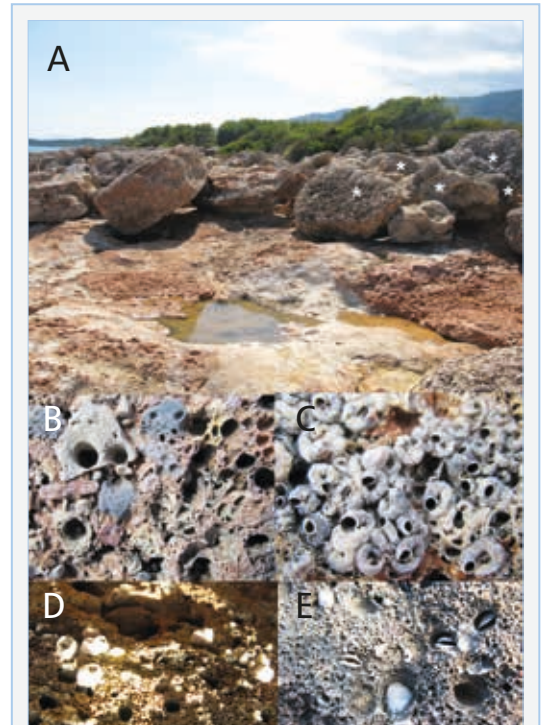
3. De cadascun dels blocs s'han calculat els valors del *Transport Figure* (TF). La mitjana de les sis àrees (68 blocs) és de 58.38 (Taula 1) amb valors màxims de 101.5 a cala Argilaga. A la Fig. 7, es representen els valors del TF dels 68 blocs. S'hi pot observar que, de forma individual, i malgrat les mitjanes, algunes àrees assolixen valors superiors a 100, amb la seva corresponent reducció del 38% del volum. Malgrat que el seus valors són relativament baixos, cal fer la seva interpretació local per establir la rellevància d'aquest valor i la seva relació amb la morfologia de cadascuna de les 6 àrees analitzades.

4. Aplicació de les equacions hidrodinàmiques. Als 68 blocs, se'ls han aplicat les equacions de Nott (2003) – Barbano et al. (2010) i Engel & May (2012). S'han obtingut valors d'alçada d'onatge (Hs) i de tsunami (Ht) necessaris per al seu desplaçament sota tres supòsits:

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

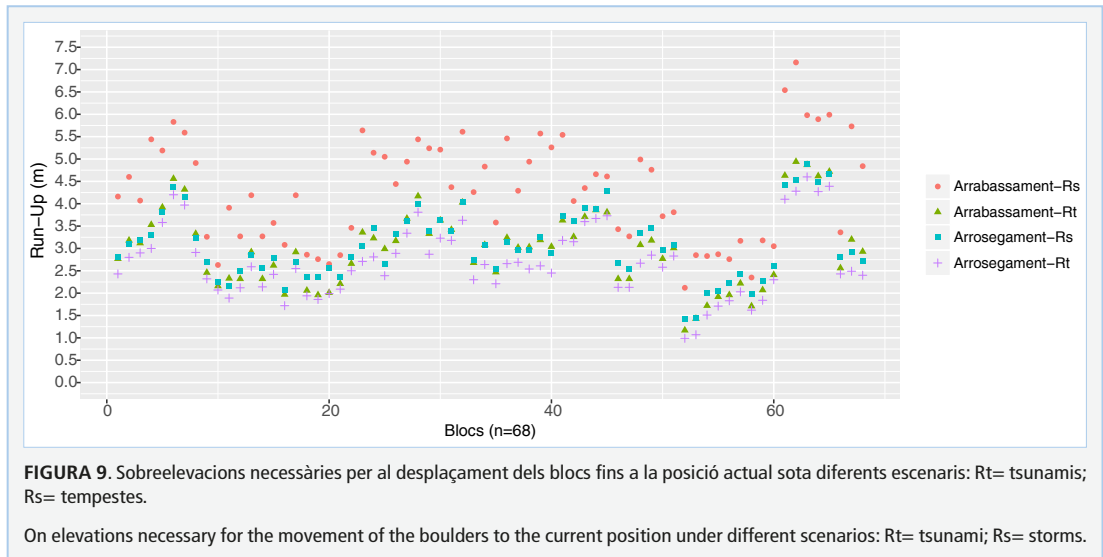
Dels 68 blocs analitzats, s'han identificat 10 blocs amb presència de perforacions incrustants marines del bivalve *Lithofaga lithofaga* (Linné, 1758), perforacions i conquilles del bivalve *Petricola lithophaga* (Retzius, 1786) i conquilles dels bivalves *Chama gryphoides* (Linné, 1758), *Ostreola stentina* (Payraudau, 1826), del gasteròpode *Vermetus triquetrus* Bivona Ant., 1832 i del crustaci *Balanus* sp. (Figura 8). Per tant, es tracta de blocs que estaven submergits i han estat trets a terra pels fluxos hídrics. A aquests blocs, se'ls han aplicat les equacions de Nott (2003) modificades per Barbano et al. (2010). Es tracta de blocs localitzats a la cala Irta (1 bloc), el pla de Roda (4 blocs), el pla de Basseta (2 blocs) i la cala Basseta (3 blocs), i que presenten uns valors de pes mitjans de 1.1 T, el quals es troben imbricats amb agrupacions amb valors de graus d'imbricació mitjana de 27.5° (Fig. 8), a distàncies mitjanes de 17 m i alçades mitjanes de 2.4 m s.n.m i obtenim un valor mig de TF de 35.49. L'aplicació de les equacions de Nott (2003) – Barbano et al. (2010), per a blocs submergits, a aquests 10 blocs, ens dona uns valors hidrodinàmics per tsunamis de Ht de 3.01 m i uns valors per tempestes de Hs de 4.95 m. Amb aquestes dades hidrodinàmiques, és difícil conjecturar que aquests blocs hagin pogut ser trets dels fons marí i ser dipositats a zones interiors de terra per onades de tempesta. Més encara, si tenim en compte les disposicions d'imbricació, que no semblen justificables amb el tipus de tempestes que es desprenen dels valors d'alçades màximes obtinguts del Punt SIMAR 2.088.123 (Fig. 1). Així mateix, la presència de les incrustacions marines també descarten la hipòtesi de Mateu (1982) sobre blocs associats a rambles.

Pel que fa als 68 blocs, als resultats de les equacions d'Engel & May (2012), tant per als casos de blocs subaeris com de blocs delimitats per juntes, i sota dos supòsits -tempestes (Hs) i tsunamis (Ht)-, se'ls ha sumat l'alçada on trobem els blocs, per establir la sobrelevació necessària per al seu transport, segons la terminologia anglosaxona, el seu *run-up* (Rt i Rs). A la Fig. 9 es presenten aquests resultats, és a dir, les alçades necessàries per al desplaçament i arrabassament dels blocs segons dos supòsits: per tsunami i per tempestes. Les mitjanes obtingudes per als 68 blocs són 3.01 m per a l'arrabassament de blocs per



**FIGURA 8.** Exemples de blocs prèviament submergits (marcats amb una estrella) al pla de la Roda. **A:** vista general; **B:** detall de perforacions del bivalve *Lithofaga lithofaga* (Linné, 1758); **C:** detall de conquilles incrustades del gasteròpode *Vermetus triquetrus* Bivona Ant., 1832; **D:** detall del crustaci *Balanus* sp.; **E:** detall de perforacions i conquilles del bivalve *Petricola lithophaga* (Retzius, 1786).

Examples of previously submerged boulders (marked with a star) on the pla de la Roda. **A:** general view; **B:** detail of perforations of the bivalve *Lithofaga lithofaga* (Linné, 1758); **C:** detail of shells embedded of the gastropod *Vermetus triquetrus* (Bivona Ant., 1832); **D:** detail of the crustaceans *Balanus* sp.; **E:** detail of perforations and shells of the bivalve *Petricola lithophaga* (Retzius, 1786).



fluxos de tsunami i 4.31 m per fluxos de tempestes. Aquests valors demostren que les tempestes possiblement no van ser les responsables de l'arrabassament d'aquests camps de blocs, ja que s'observa a la Fig. 9 que molts dels blocs requereixen valors superiors a la mitjana de 4.31. Pel que fa a les mesures de sobreelevació o *run-ups* per arrossegar els blocs aeris, obtenim valors de Rt de 2.7 m i Rs de 3.06 m, els quals s'ajusten tant a ones de tsunamis com de tempesta. Les ones màximes de tempesta registrades assoleixen aquesta capacitat d'arrossegament de blocs, però no poden arrabassar els blocs de la seva posició original i dipositar-los a distàncies mitges de 15.5 m de la línia de costa.

La Fig. 9 recull les columnes d'aigua necessàries per al desplaçament dels blocs sota els quatre supòsits. Els valors d'altura d'ona per a blocs arrabassats per tempesta (Rt) són de 4.31 m i ja ens informen que difícilment s'han donat tempestes amb columnes d'aigua d'aquestes magnituds, sobretot per les distàncies de la costa a les quals es troben els blocs (Fig. 3). No obstant això, l'orientació dels blocs (Fig. 1) es troba molt propera als fluxos dels onatges de tempesta de major freqüència i intensitat que es donen en aquest sector (Fig. 5). Així mateix, cal destacar les imbricacions dels blocs, amb pendents de 52.9°, les quals ens indiquen la necessitat de fluxos de gran

energia, i per tant d'onatge de tsunami, per a crear aquests camps de cordons imbricats.

## Discussió i conclusions

Atesa la presència, mida, disposició i orientació d'aquests blocs, s'ha de concloure que es troben associats a les orientacions de les trajectòries de tsunamis definides per Álvarez et al. (2011). Malgrat això, posteriorment, els blocs d'algunes àrees, especialment les afavorides per perfils baixos, batimetria suau i blocs propers a la cornisa, poden ser retreballats puntualment per l'onatge de tempesta de gran energia, especialment modificant els seus graus d'imbricació (Roig-Munar et al., 2016).

L'orientació mitjana de tots els blocs indica l'afectació de la costa per trajectòries de tsunamis procedents del nord d'Algèria a través del canal que hi ha entre Eivissa i Mallorca, orientacions compatibles amb les simulacions realitzades per Álvarez-Gómez et al. (2010, 2011), tot i que s'han de tenir presents també les possibles trajectòries provinents de la mar d'Alborà.

L'aplicació de l'equació del *Transport Figure* (Scheffers & Kelletat, 2003) permet destriar blocs associats a diferents fluxos (tsunami i/o tempesta). En aquesta ocasió, els resultats ens inclinarien envers les ones de 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 de Castelló es presenta com un sector mixt de tempesta i tsunami, on els blocs i les plataformes mostren pocs símptomes de retreballament per onades als primers metres de la cornisa, mentre que a la zona de blocs no hi ha marques d'impactes, fet que ens indica que aquests han estat arrabassats sols per tsunamis. També cal destacar que els blocs presenten eixos curts associats a terrasses de denudació i que mostren, per tant, que han estat arrabassats terra endins per fluxos de tsunamis.

L'aplicació de les equacions de Nott (2003), Barbano et al. (2010) i Engel & May (2012) permeten definir les columnes d'aigua necessàries per arrabassar i moure els blocs. En concret, les sobrelevacions necessàries per arrabassar-los amb ones de tempesta semblen descartar aquest origen i, juntament amb les altres característiques, ens fa considerar-los fruit també de les ones de tsunamis. Igual succeeix amb els blocs que presenten fauna marina incrustada i que es trobaven, per tant, submergits: sembla molt poc probable, a la vista dels resultats de les equacions hidrodinàmiques, que puguin haver sortit com a conseqüència d'ones de tempesta i probablement el seu transport s'haurà produït a causa d'un flux de tsunami.

Es recomana analitzar aquests indrets de blocs de tempesta i tsunami com a possible Lloc d'Interès Geològic (LIG) per a la seva posterior protecció, seguint els criteris de Roig-Munar et al. (2017c, 2018c) a Menorca i Formentera.

## Agraïments

A Jessica del Moral per donar-nos les primeres indicacions sobre blocs de grans dimensions a les costes rocoses d'Alcossebre. Als dos revisors anònims perquè les seues correccions i suggeriments han contribuït a millorar l'article.

## Bibliografia

**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.

**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.

**Balaguer, P. 2012.** Implicaciones de la Geomorfología en las Inicativas 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*. Monografies de la Societat d'Història Natural de les Balears, 19; 402 pp.

**Barbano, M. S., Pirrotta, C. & Gerardi, F. 2010.** Large boulders along the south-eastern Ionian coast of Sicily: Storm or tsunami deposits? *Marine Geology*, 275: 140-154.

**Bertotti, L. & Cavaleri, L. 2008.** Analysis of the Voyager storm. *Ocean Engineering*, Vol. 35 (1): 1-5.

**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. & 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.

**Browne, A. 2011.** Coarse coastal deposits as palaeo-environmental archives for storms and tsunamis. 277 pp. PhD thesis, Southern Cross University, Lismore, NSW.

**Dalal, N. & Torab, M. 2013.** Large boulders deposits on the coast of Ras El Hekma, NW coast, Egypt. Storm or tsunami?. The 2nd International Symposium on Kaz Mountains and Edremit, 2-4 May, 2013, Edremit-Balıkesir-Turkey.

**Decret 108/2002**, de 16 de juliol del Govern Valencià, de Declaració del Parc Natural de la Serra d'Irta i de la Reserva Natural Marítima d'Irta. DOGV (Diari Oficial de la Generalitat Valenciana) núm. 4298 de 23/07/2002.

**Engel, M. & 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.

**Etienne, S. & Paris, R. 2010.** Boulder accumulations related to storms on the south coast of the Reykjanes Peninsula (Iceland). *Geomorphology*, 114: 55-70.

**Fita L., Romero R., Luque A., Emanuel K. & Ramis C. 2007.** Analysis of the environments of seven Mediterranean tropical-like storms using an axisymmetric, nonhydrostatic, cloud resolving model. *Natural Hazards and Earth System Science* 7: 41-56.

**Forner, E. & Brewster, J. 2013.** First observation of Triops (Crustacea: Branchiopoda: Notostraca) in the Natural Park of the Serra d'Irta (Peníscola, el Baix Maestrat). *Nemus*, 3: 101-109.

**Furlani, S., Pappalardo, M., Gómez-Pujol, L. & Chelli, A. 2015.** The rock coast of the Mediterranean and Black seas. In: *Geological Society, London, Memoirs* 2014, V. 40: 89-123.

**Gracia, F. J., Alonso, C., Benavente, J., Anfuso, G. & del Rio, L. 2006.** The different coastal records of the 1755 tsunami waves along the south Atlantic Spanish coast. – *Z. Geomorph. N.F.* 146: 195–220

**Gili, J. M. 2001.** Biodiversitat marina mediterrània. *L'Atzavara*, 9: 25-35.

**Goff, J., Dudley, W. C., de Maintenon, M. J., Cain, G., Coney, J. P. 2006.** The largest local tsunami in 20th century Hawaii. *Marine Geology*, 226: 65-79.

**Goto, K., Chavanich, S. A., Imamura, F., Kunthasap, P., Matsui, T., Minoura, K., Sugawara, D. & Yanagisawa, H. 2007.** Distribution, origin and transport process of boulders deposited by the 2004 Indian Ocean tsunami at Pakarang Cape, Thailand. *Sedimentary Geo-*

logy, 202: 821-837.

**Goto K., Miyagi, K., Kawana, T., Takahashi, J. & 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.

**IGME Instituto Geológico y Minero de España. 1973.** Mapa geológico de España. E. 1:50.000. Hoja 594 Alcalá de Chivert. 17 pp. y mapa. Servicio de publicaciones del Ministerio de Industria. Madrid.

**Imamura, F., Goto, K. & Ohkubo, S. 2008.** A numerical model for the transport of a boulder by tsunami. *Journal of Geophysical Research*, 113, 7: 1-12.

**Kelletat, D., Scheffers, A. y Scheffers, S. 2005.** Tsunami-eine unterschätzte Naturgefahr? - Geowissenschaftliche Mitteilungen: 5-13.

**Lario, J., Bardají, T., Spencer, C. & Marchante., A. 2017.** Eventos de oleaje extremo en la costa del sureste peninsular: bloques y megabloques como indicadores de tsunamis o tormentas extremas. *Geo-Temas*, 17, 227-230.

**Lionello, P. & Sanna, A. 2005.** Mediterranean wave climate variability and its links with NAO and Indian Monsoon. *Climate Dynamics*, 25 (6): 611-623.

**Maouche, S., Morhange, C. & Meghraoui, M. 2009.** Large Boulder accumulation on the Algerian coast evidence tsunami events in the western Mediterranean. *Marine Geology*, 262: 96-104.

**Mastroruzzi, G. 2010.** Tsunami in Mediterranean Sea. *The Egyptian Journal of Environmental Change*, 2: 1-12.

**Mateu, J. F. 1982.** El norte del País Valenciano, geomorfología litoral y prelitoral. 285 pp. Universidad de València, secció de Geografia. València.

**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., Barthomeuf, B., Desgages, E., Grancher, D., Baumert, P., Vautier, F., Brunstein, D. & 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.

**Periáñez, R. & 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., Ferilli, S., Capolongo, D., Marsico, A., Milella, M., Pennetta, L., Piscitelli, A. & Mastroruzzi, G. 2010.** Morphological evidences and computer science techniques in order to evaluate tsunami inundation limit. *Rivista Italiana di Telerilevamento*, 42: 129-142.

**Roger J. & 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 tsunami a les costes rocoses de les Illes Balears. Anàlisi geomorfològica i morfomètrica. 410 pp. Tesis doctoral. Departament de Geodinàmica i Geofísica. Universitat de Barcelona.

**Roig-Munar, F. X., Forner, E., Martín-Prieto, J. Á., Segura, J., Rodríguez-Perea, A., Gelabert, B. & Vilaplana, J. M. 2018b.** Bloques indicadores de tsunamis en las costas rocosas de la serra d'Irta (Castelló, País Valencià). En: García, C., Gómez-Pujol L., Morán Tejada, E. y Batalla, R.J. (eds), *Geomorfología del Antropoceno. Efectos del cambio Global sobre los procesos geomorfológicos*: 173-176. Universitat de les Illes Balears, Sociedad Española de Geomorfología, Palma.

**Roig-Munar, F. X., Martín-Prieto, J. A., Rodríguez-Perea, A., Gelabert-Ferrer B. & Vilaplana Fernández, J. M. 2017a.** Anàlisi morfomètrica de bloques de tsunami en la isla de Formentera, islas Baleares. *Cuaternario y Geomorfología*, 31 (3-4), 7-24

**Roig-Munar, F. X., Martín-Prieto, J. A., Rodríguez-Perea, A., Gelabert-Ferrer, B. & Vilaplana Fernández, J. M. 2017b.** Morfometría 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., Martín-Prieto, J. A., Rodríguez-Perea, A., Gelabert-Ferrer, B., Vilaplana, J. M., 2018c.** Propuesta de Lugares de Interés Geológico asociados a bloques de origen tsunamítico en las costas rocosas de la isla de Formentera (Islas Baleares). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 31(1): 31-40.

**Roig-Munar, F. X., Mata-Lleonard, R., Rodríguez-Perea, A., Martín-Prieto, J. A., Vilaplana, J. M., Gelabert Ferrer, B., 2017c.** Propuesta de Lugares de Interés Geológico asociados a bloques y cordones de origen tsunamítico en la costa SE de Menorca (Balears). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 30(1): 31-40.

**Roig-Munar, F. X., Rodríguez-Perea, A., Martín-Prieto, J. A., Vilaplana, J. M. & Gelabert, B. 2015.** Morfometría de bloques de tsunami en las costas rocosas del Este de Mallorca (Islas Baleares). *Revista Geo-Temas*, 15, 229-232.

**Roig-Munar, F. X., Rodríguez-Perea, A., Martín-Prieto, J. A., Vilaplana, J. M., Gelabert, B., Pons, G. X. & Mir-Gual, M. 2014.** Morfometría de bloques de tsunami en las costas rocosas del sur de Mallorca (I. Baleares). In J. A. Álvarez-Gómez & F. Martín-González (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., Vilaplana, J. M., Rodríguez-Perea, A., Martín-Prieto, J. A. & Gelabert B. 2016.** Indicadores geomorfológicos de tsunamis históricos en las costas rocosas de Baleares. *Rev. Geo-Temas*, 16 (1): 641-644.

**Roig-Munar, F. X., Vilaplana, J. M., Rodríguez-Perea, A., Martín-Prieto, J. A. & Gelabert, B. 2018a.** Tsunamis boulders on the rocky shores of Minorca (Balearic Islands). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, en prensa.

**Sahal, A., Roger, J. & Allgeyer, S. 2009.** The tsunami triggered by the 21 May 2003 Boumerdès-Zemmouri (Algeria) earthquake: field investigations on the French Mediterranean coast and tsunami modeling. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9: 1823-1834.

**Scheffers, A. & Kelletat, D. 2003.** Sedimentologic and geomorphic tsunami imprints worldwide - a review. *Earth-Science Review*, 63: 83-92.

**Scheffers, A. & Kinis, S. 2014.** Stable imbrication and delicate/unstable settings in coastal boulder deposits: Indicators for tsunami dislocation? *Quaternary International*, 332: 73-84.

**Scheffers, A. & Scheffers, S. R. 2006.** Documentation of Hurricane Ivan on the Coastline of Bonaire. *Journal of Coastal Research*, 22: 1437-1450.

- Scheffers, A. & Scheffers, S. R. 2007.** Tsunami deposits on the coastline of West Crete (Greece). *Earth and Planetary Science Letters*, 259 (3-4): 613-624.
- Shah-Hosseini, M., Morhange, C., de Marco, A., Wante, J., Anthony, E. J., Sabatier, F., Mastronuzzi, G., Pignatelli, C. & Piscitelli, A. 2013.** Coastal boulders in Martigues, French Mediterranean: evidence for extreme storm waves during the Little Ice Age. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 57, Suppl. 4: 181-199.
- Sotillo, M., Ratsimandresy, A., Carretero, J., Bentamy, A., Valero, F. & González-Rouco, F. 2005.** A high-resolution 44-year atmospheric hindcast for the mediterranean basin: contribution to the regional improvement of global reanalysis. *Climate Dynamics*, 25: 219-236.
- Suañez, S., Fichaut, B. & 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.
- Spiske, M., Weiss, R., Bahlburg, H., Roskosch, J. & Amijaya, H. 2010.** The TsuSedMod inversion model applied to the deposits of the 2004 Sumatra and 2006 Java tsunami and implications for estimating flow parameters of palaeo-tsunami. *Sedimentary Geology*, 224: 29-37.
- Trenhaile, A. S. 2005.** Modelling the effect of waves, weathering and beach development on shore platform development. *Earth Surface Processes and Landforms*, 30: 613-634.
- Weiss, R. 2012.** The mystery of boulders moved by tsunamis and storms. *Marine Geology*, 295- 298, 28-33.
- Whelan, F. & Kelletat, D. 2003.** Analysis of tsunami deposits at cabo de Trafalgar, Spain, using GIS and GPS technology. – *Essener Geogr. Arb.* 35: 11–25.
- Whelan, F. & Kelletat, D. 2005.** Boulder deposits on the Southern Spanish Atlantic Coast: possible evidence for the 1755 AD Lisbon Tsunami? – *Sci. Tsunami Haz.* 23: 25–38.
- Zhao, X., Chen, Y., Huang, Z. & Gao, Y., 2017.** A numerical study of tsunami wave run-up and impact on coastal cliffs using a CIP-based model. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 1-17.

Rebut el 30 de juny de 2018. Acceptat el 12 de setembre de 2018.