

Efectes de la borrasca Glòria sobre els blocs elevats de la costa rocosa de la serra d'Irta (el Baix Maestrat, País Valencià)

Francesc Xavier Roig-Munar¹, Enric Forner i Valls², Joaquín Segura Collado², Vicent Gual i Orf², José Ángel Martín-Prieto¹, Antonio Rodríguez-Perea³, Bernardí Gelabert Ferrer⁴ & Joan Manel Vilaplana Fernández⁵

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

2. Ateneu de Natura. Sant Roc, 125 3r 5a 12004 Castelló de la Plana. e-mail: ateneudenatura@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. Universitat de Barcelona, Martí i Franqués, s/n, 08028 Barcelona.

Rebut el 14.05.2020. Acceptat el 22.05.2020

La presència de grans blocs elevats a les costes rocoses han estat interpretats molt sovint associats a l'impacte de tsunamis i/o onades de grans tempestes. Aquests blocs han estat identificats a diferents sectors de la costa rocosa de la serra d'Irta (el Baix Maestrat, País Valencià).

La borrasca de gener del 2020, anomenada Glòria, amb xifres d'onatge no assolides a la mar Balear, que ha suposat els rècords des que es tenen registres tant de l'alçada màxima, d'ona significant, com d'un període mai no conegut de més de 100 hores d'onatge extrem, representa una oportunitat excepcional per a discernir blocs associats a tempestes extremes o tsunamis.

Del treball de camp realitzat a les àrees de blocs es conclou que la borrasca Glòria no ha pogut moure els blocs que s'havien mesurat en estudis previs per avaluar la seua procedència. Tanmateix sí que ha mogut blocs menors que formaven part dels cordons tsunamítics. També s'ha constatat que la tempesta Glòria ha estat capaç d'arrabassar blocs que estaven submergits i deixar-los damunt la plataforma. Els blocs moguts per la Glòria presenten les següents característiques: es troben de forma aïllada i dispersa; no estan imbricats i es presenten en posició horitzontal o subhoritzontal, per tant no es pot apreciar orientació; la distància des de la posició actual a la línia de l'aigua és més curta que a la mostra de blocs de tsunami i, finalment, la seua elevació sobre el nivell de la mar és notablement menor que els considerats generats per tsunamis.

L'estudi ha permès, a raser d'una tempesta excepcional, contrastar les hipòtesis alternatives sobre l'origen dels blocs. Existeixen a la serra d'Irta estructures de blocs imbricats formant cordons que s'han generat a conseqüència de tsunamis. Aquest treball ha ratificat que els caràcters morfològics d'aquests blocs, en parelles dicotòmiques es presenten en solitari o en conjunt; horitzontals o plantats; sense compondre cap estructura o imbricats en cordons. Aquestes singularitats permeten assignar la causa que els ha generat. Si es produeixen els primers elements de la dicotomia, s'apunta cap a tempesta extrema; si coincideixen els segons s'hauria de considerar que el causant és un tsunami.

Mots clau: tempesta extrema, borrasca Glòria, tsunamis, blocs, costa rocosa, serra d'Irta, el Baix Maestrat.

Effects of storm Gloria on the elevated boulders of the rocky coast of the Serra d'Irta (the Baix Maestrat, Valencian Country)

The existence of boulders high on rocky shores has been interpreted as either being caused by the impact of tsunamis or large storm waves. These boulders, nested in cords, have been identified at different points on the Balearic Islands and in the Sierra de Irta (the Baix Maestrat, Valencian Country).

The recent storm of January 2020, named Gloria, produced waves of a ferocity previously unrecorded in the Balearic Sea, breaking records for both maximum wave height and length together with an unprecedented period of more than 100 hours of continuous wave activity. Gloria has presented us with a unique opportunity to establish whether elevated boulders were lifted into position by extreme storms or by tsunamis.

The results of the fieldwork support the conclusion that storm Gloria, which hit the coast at the Sierra d'Irta between the 19th and 23rd January 2020, was not capable of moving the larger boulders that had been identified

and measured in previous studies to assess their provenance.

However, it is found that smaller boulders which formed part of the Tsunami cordon were moved by storm Gloria. It is also found that the storm was able to snatch boulders that were previously submerged and leave them on rocky, coastal ledges. These boulders moved by Gloria have the following characteristics: They are isolated and sparse; they do not form overlapping cords; they are presented in both a horizontal and sub-horizontal position and, as such, their orientation cannot be established; the distance from both their current position to the waterline and their elevation above sea level is noticeably less than that of the blocks considered moved by tsunamis.

Storm Gloria allowed this study to test alternative hypotheses about the origin of these boulders. There are elevated boulder structures on the coast of the Sierra d'Irta, intertwined to form cords, that were generated by Tsunamis. This work has confirmed the morphological characteristics of these boulders (in dichotomous pairs): solitary or grouped; horizontal or planted; lacking in structure or nested in cords; and which allows us to assign the cause that generated them. If the first elements of the dichotomy occur, they point to an extreme storm, if the second ones occur, the cause should be considered a tsunami.

Keyword: extreme storm, storm Gloria, tsunamis, boulders, rocky shores, Irta mountain range, the Baix Maestrat.

Roig-Munar et al. (2018a, 2018b) van analitzar sis àrees de blocs de grans dimensions a les costes rocoses de la serra d'Irta, partint de la hipòtesis que els blocs, per la seva disposició, imbricació, morfometria, orientacions, i per la seva ubicació geogràfica, amb relació a les modelitzacions Roger y Hébert (2008) i Álvarez-Gómez et al. (2011), podien ser atribuïbles a fenòmens de tsunamis. Basant-se en aquesta hipòtesi inicial es van aplicar les equacions de Nott (2003) i Engel & May (2012) per tal de discernir les forces hidrodinàmiques que havien actuat sobre la costa i havien generat aquests camps de blocs, diferenciant blocs submergits, blocs arrabassats i blocs desplaçats baix els supòsits d'onatge de tempesta o flux de tsunami. La disposició dels blocs s'ajusta al patró sedimentològic dels blocs de tsunami de la Mediterrània occidental, on diversos autors atribueixen la imbricació en unes costes de fetch reduït al flux de tsunami (Roig-Munar et al. 2020), a diferència dels resultats obtinguts a l'Atlàntic, on Cox et al. (2019) i Cox (2020) atribueixen la imbricació a la successió de tempestes sobre costes rocoses amb amplies rangs mareals i grans fetch.

Els resultats obtinguts a Irta apuntaven que la costa havia estat afectada per un tsunami, generant una distribució de blocs dipositats a les cotes superiors en forma de cordons imbricats per tsunamis. Segons Roig-Munar et al. (2018b: 18) els tsunamis, amb font a Algèria, arriben a la costa d'Irta entre les illes de Mallorca i Eivissa, coincidint amb l'orientació dels blocs. Malgrat els resultats de les equacions hidrodinàmiques aplicades, els autors, degut a la tipologia de

costa, a l'alçada s. n. m. i a la proximitat a la cornisa, no descartaven la possibilitat que alguns poguessin ser atribuïbles a tempestes de gran energia.

La borrasca Glòria, de dimensions no registrades històricament a la Mediterrània occidental, ha permès l'extracció de noves dades relatives a la influència de la borrasca sobre els blocs de tsunami, podent donar d'aquesta manera resposta a alguns dubtes que quedaren oberts (Roig-Munar et al. 2018b) i, també, ha permès revisar dades morfomètriques dels blocs analitzats al 2018, així com donar validesa a les conclusions d'aquell treball.

Mètode i materials

Marc geogràfic i geològic

La serra d'Irta, d'orientació catalànide (NE-SO), és una serralada litoral, de materials predominantment juràsics, que s'allarga paral·lela a la línia de costa entre el tómbol arenós de Peníscola i el poblat mariner d'Alcossebre (terme d'Alcalà de Xivert). Ocupa bona part de la franja marítima de la comarca del Baix Maestrat, situada a migjorn del delta de l'Ebre (Fig. 1). La zona estudiada es troba a la Mediterrània occidental, a l'àrea geogràfica definida com la mar Balear i la mar Tirrena (Gili 2001) o, més limitadament, com a sector biogeogràfic de la mar Balear i la mar de Sardenya (Bianchi 2007).

Quasi la totalitat de la superfície analitzada, excepte l'extrem més al S, queda dins de l'àmbit territorial classificat com a parc natural de la Serra d'Irta (Decret

108/2002). A la part més meridional, al S dels penya-segats de la Torre Badum, la serra d'Irta està lleugerament retirada de la línia de costa, configurant terrasses rocoses relativament planes de dimensions reduïdes, "plans" en la terminologia local, que s'estenen entre els pendents abruptes de la serra i la vora de la mar, on un conglomerat quaternari ha recobert les calcàries juràsiques. Aquesta part del litoral, de costa rocallosa, no està intensament urbanitzada com quasi la resta del País Valencià, fet que ha permès conservar el registre sedimentari de blocs de tsunamis. Els blocs analitzats i definits com a tsunamis estan formats per conglomerats quaternaris. L'àrea estudiada va ser descrita amb més detall per Forner & Brewster (2013) i Roig-Munar et al. (2018b). És tal la rellevància d'aquests blocs dins el context del mediterrani peninsular que Roig-Munar et al. (2019) analitzaren els seus valors per ser declarats com a lloc d'interès geològic (LIG).

Les onades més intenses a la Mediterrània occidental procedeixen de vents que tenen l'orientació del NE (Sotillo et al. 2005). L'energia de l'onatge està condicionada pel fetch, la distància des de la qual pot arrancar l'ona fins que trenca amb la costa (Fig. 1). Com major és el fetch, major pot ser l'alçada assolida per les onades. El conjunt de dades que aporta l'altura d'ona significativa és important per l'estudi de la costa, caracteritzant la severitat d'un temporal per l'energia, per la direcció de la seva procedència (Cañellas et al. 2007) i pel seu període.

Formació i evolució de la borrasca Glòria

L'Agència Estatal de Meteorologia, el divendres 17 de gener de 2020, va anomenar Glòria a la borrasca de perturbació superficial localitzada a l'oceà Atlàntic, atesos la tempesta i el temporal marí que va generar. Aquesta perturbació es va desenvolupar i desplaçar cap a l'E fins arribar a la Mediterrània, doblant al dia següent la seua mida, mentre un anticicló se situava sobre les illes Britàniques. La borrasca va continuar la seua rotació ciclònica, i cap al migdia del dia 19 tenia el centre entre l'illa d'Eivissa i el cap de la Nau, amb una pressió al voltant dels 1011 hPa. Un potent anticicló centrat al S de Gran Bretanya, amb un màxim històric de més de 1050 hPa, va fer que es configurés un fort gradient de pressió des del S de França fins les illes Balears, provocant vents de fortes ratxes i un onatge que va assolir valors rècord en aquest sector de la Mediterrània (AEMET 2020; Amores et al. 2020).

Els avisos de fenòmens costers de nivell vermell van afectar la major part del litoral de les illes Balears, Catalunya i el País Valencià entre els dies 19 i 23 de gener, essent severos a la franja litoral que va des del cap de Creus fins al cap de la Nau i les illes Balears, causant una forta erosió a las platges, inundacions en molts trams costaners (Guillén 2020), i danys materials a les cotes urbanitzades.

L'onatge, segons Puertos del Estado (2020), va establir un record al mesurar-se una altura significant de 8,44 m a la boia de València el dia 20 a les 06 UTC,

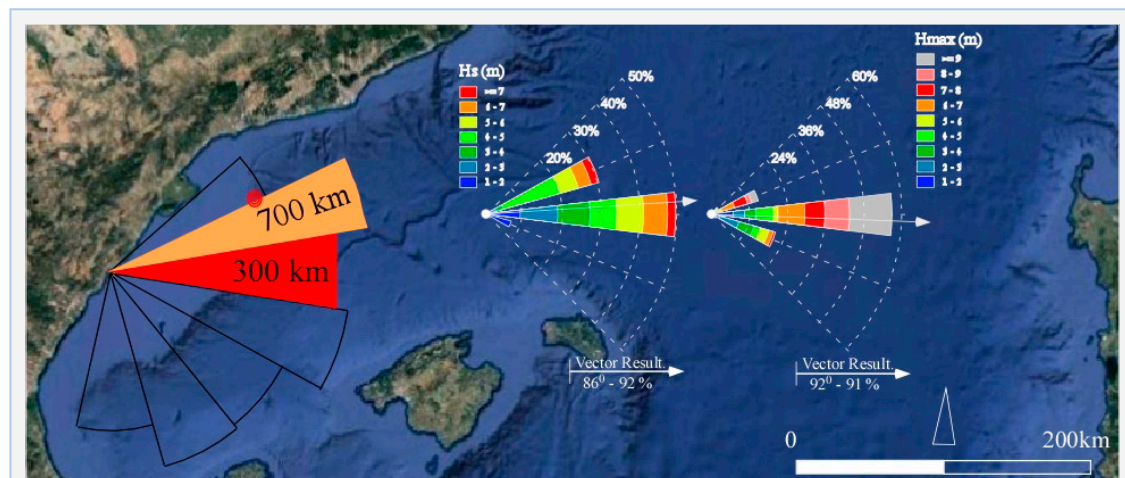


FIGURA 1. Principals direccions de fetch a la serra d'Irta (el Baix Maestrat, País Valencià). Rosa de vents, de l'altura d'ona significativa (esquerra) i rosa de vents de l'altura d'ona màxima (dreta) entre el 19 i el 24 gener de 2020 a la boia de Tarragona (punt roig).

Main fetch directions in the Serra d'Irta (The Baix Maestrat, País Valencià). Wind rose, of significant wave height (left) and wind rose of the maximum wave height (right) between 19 and 24 January 2020 in the buoy of Tarragona (red dot).

sent l'anterior record de 8,2 m en la boia de Maó en desembre de 2014, i en el cas de la boia de Tarragona es va registrar una altura de 7,6 m el dia 20 de gener a las 16 UTC.

La direcció de l'onatge va presentar una component ENE des de l'inici del temporal, fins orientar-se finalment a un component E a partir de la matinada del dia 20 de gener, i coincidint amb els valors màxims. A la Fig. 2 s'aprecia l'evolució de la altura significant i l'altura màxima de l'onatge, superant el llinar d'excedència a partir de las 07:00 h del 19 de gener, situació que es va allargar fins a baixar per sota del mateix a les 13:00 h del dia 23 de gener. La duració del temporal va superar, doncs, les 100 hores, amb un pic que es va produir el dia 20 a las 13:00 h, amb altures significants (H_{m0}) de 7,6 m i de 12,7 m d'altura màxima (H_{mx}), i assolint el període pic (T_p) de 13,7 s. Aquest mateix dia va haver diferents pics d'altura d'ona que van superar els 10 m de H_{mx} . El nombre d'hores en les quals l'alçada màxima d'onada va superar els 11 m. van ser de 6. L'altura d'ona significant (H_s), va superar en 5 hores els 7 m, i el vent va mostrar el mateix comportament direccional, amb una velocitat màxima de 18,3 m/s (65,9 Km/h), presentant el nivell de la mar els màxims valors coincidint amb el pic del temporal, assolint una altura màxima de

0.6 m (Puertos del Estado 2020).

La línia de costa a la zona d'estudi, orientada de NE a SO, es va veure directament afectada per l'onatge procedent de l'E, que va ser la component de major freqüència i energia de la borrasca Glòria, amb un fetch de 300 km (Fig. 1), i en menor mesura per la component ENE (fetch de 700 km).

Pel que respecta a l'altura d'ona significant (H_s) a la Fig. 1 podem observar que el vector resultant té una direcció de 86° de component E, que és la de major energia i freqüència (del 49,3%), juntament a la component ENE (30,6%). El rang d'altura de l'ona de major freqüència és el de 4-5 m amb un 22,2%; totes les que supera els 5 m acumulen el 25,7%; i les superiors a 7 m un 4,2%. El període mitjà és de 7,3 s, amb un màxim de 9,1 s.

L'altura d'ona màxima (Fig. 1) podem observar que segueix un patró similar al de l'ona significant respecte a la direcció, amb la component E, encara més accentuada, amb una freqüència del 56,3%, davant al 15,3% de la component ENE i el 20,8% de l'ESE. Destaca l'onatge superior als 6 m d'altura que és del 49,3% (del total en el període examinat). L'onatge que supera els 9 m d'altura màxima arriba al 15,3%, amb un 86% de component Est. En el període pic (T_p), és de mitjana

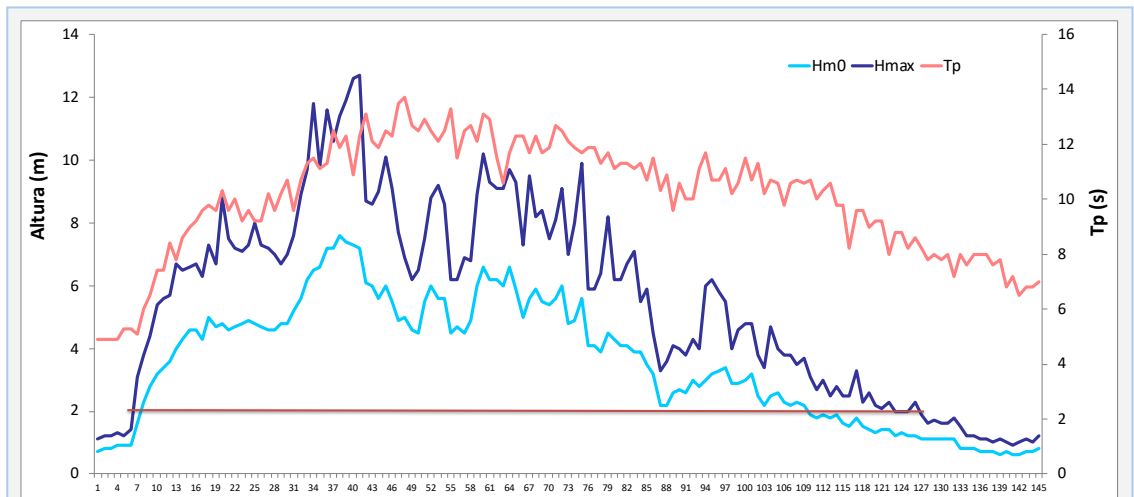


FIGURA 2. Altura d'ona significant (H_{m0} , en blau clar, en metres); màxima onada (H_{mx} , en blau fosc, en m) i període de pic (T_p , en roig, en segons), durant el temporal Glòria. Dades procedents de la boia de Tarragona (Puertos del Estado, 2020), La línia roja horitzontal és el llinar d'excedència, que marca la presència d'un succés extrem, i que està fixat a la zona quan $H_{m0} > 2$ m. L'abscissa representa el número d'hores UTC correlatives des de la inicial el dia 19/01/2020 a la 01:00 h fins al dia 24/01/2020 a les 08:00 h.

Significant wave height (H_{m0} , in light blue, in meters); maximum wave (H_{mx} , in dark blue, in m) and peak period (T_p , in red, in seconds), during the storm Glòria. Data from the buoy of Tarragona (Puertos del Estado, 2020), The horizontal red line is the threshold of leave, which marks the presence of an extreme event, and which is fixed in the area when $H_{m0} > 2$ m. The abscissa represents the number of correlative UTC hours from the initial on 19/01/2020 at 01:00 h to 24/01/2020 at 08:00 h.

de 10,1 s, assolint el màxim de 13,7 s.

S'analitzen els valors d'altura d'ona significant estimats, i corresponents al període de retorn més llarg (475 anys), aprofitant l'anàlisi estadística proporcionada per Puertos del Estado (2020) per a valors extrems, i tenint en compte la component direccional E de la boia de Tarragona. La dada del valor de retorn estimat de Hm0 només supera les xifres reals del temporal Glòria per a períodes de retorn que superen els 475 anys, sent notablement inferior per períodes de retorn de 20 i 50 anys (Taula 1). Mentre que per al període de pic (T_p), els valors estimats són tots inferiors al registre d'aquest temporal, que és de 13,3 s, trobant-nos, segons les dades extrems, davant un temporal d'extrema energia.

Mètode

Per comprovar l'efecte de la borrasca Glòria sobre els blocs de tsunami es van recollir dades de camp per identificar els efectes morfològics de la borrasca sobre 4 àrees de les sis analitzades al 2018. Aquestes dades van ser recollides els dies 8/02/2020 i el 05/03/2020. A les àrees d'estudi es van prendre mesures de desplaçaments de blocs associats a tempestes, seguint la metodologia de Roig-Munar et al. (2017) i Martín-Prieto et al. (2018) a les illes Balears.

Les mesures dels desplaçaments s'han pres amb cinta mètrica i s'han fet fotografies de repliques als cordons i/o agrupacions de blocs, que en el seu dia es van mesurar per comprovar si s'havien produït moviments o desplaçaments recents de blocs com unitats, les bases de blocs i/o els cordons. Als blocs identificats com a nous o trets per la mar, definits com a submergits, se'ls hi han aplicat les equacions de Scheffers & Kelletat (2003) denominada Transport Figure (TF). Es tracta d'una equació simple que consisteix a multiplicar el 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 aproximació a l'energia necessària pel transport dels blocs on, els valors superiors a 250 de TF es consideren blocs transportats per tsunamis.

$$(1) TF = P \cdot D \cdot H$$

Així mateix s'ha utilitzat l'equació hidrodinàmica de Nott (2003), que permeten calcular els valors hidrodinàmics necessaris per l'arrabassament i desplaçament de blocs sota diferents supòsits, utilitzant en aquest treball les equacions per a blocs submergits:

$$(2) Ht = [(rs-rw/rw)b^2c] / [2(Cdc^2+Clb^2)]$$

Período de retorno	Hs Gloria	Hs 20 años	Hs 50 años	Hs 225 años	Hs 475 años
Estima Hs (m)	7,6	5,74	6,43	7,54	8,08
Estima Tp (s)	13,3	9,62	10	10,55	10,81

TAULA 1. Valors comparatius d'ona significant (Hm0) entre la tempesta Glòria i les estimacions per a diversos períodes de retorn, segons Puertos del Estado (2020) d'episodis de règim extrem per al sector direcció E, per a les dades de la boia de Tarragona.

Comparative values of significant wave (Hm0) between the Gloria storm and the estimates for various return periods made by Puertos del Estado (2020) of episodes of extreme regime for the eastbound sector, for the buoy data of Tarragona.

$$Hs = [(rs-rw/rw)b^2c] / [0,5(Cdc^2+Clb^2)]$$

On Ht i Hs són les alçades d'ona trencant necessàries per treure els blocs submergits en un escenari de tsunami (Ht) i de tempesta (Hs); rs és la densitat de l'aigua i rw és la densitat del bloc; a és l'eix llarg, b és l'eix mig del bloc i c l'eix curt. Cl i Cm són coeficients empírics d'elevació i massa, Cd és el coeficient d'arrossegament.

Aquestes dades morfomètriques obtingudes al camp s'han relacionat amb dades atmosfèriques de la borrasca Glòria obtingudes de l'Agència Estatal de Meteorologia (AEMET 2020), i dades donatge de Puertos del Estado (2020). Aquestes dues variables tenen com objectiu definir les condicions de l'onatge de mitjana i extrem que afectaren a la zona d'estudi.

Per valorar el règim de l'onatge de la zona d'estudi s'avaluen les dades ofertes pel conjunt REDTEX (mesures procedent de la Xarxa de Boies d'Aigües Profundes, Puertos del Estado 2020), de la boia de Tarragona (Fig. 1), situada a 125 km al NE de la serra d'Irta (longitud: 1,47E i latitud: 40,68N). També s'ha utilitzat alguna dada de la boia de València. Les dades utilitzades al treball consisteixen en sèries temporals donatges (altura significant, període mitjà i pic, altura màxima i paràmetres de direcció) amb una freqüència de 60'. La altura significativa o significant (Hs o Hs0) és la mitjana aritmètica de l'altura del terç d'ones més altes registrades en un període de 20' a 30' en metres.

El règim extrem de l'onatge pot considerar-se com la distribució dels valors màxims d'altura d'ona significant. La caracterització d'aquest règim es realitza mitjançant el mètode del pic sobre el llinar, definint-se el llinar de referència per damunt del qual es considera la presència d'un succés extrem. Per al cas de la boia de

Tarragona, el llinar de règim extrem se situa a partir dels 2 m de Ha de l'ona per la component E (Puertos del Estado 2020). Per tant, la duració de la tempesta es defineix com l'interval de temps des que l'alçada de l'ona supera el llinar establert fins que retorna altra vegada per sota del mateix.

Abreviatures: Hmx: altura d'ona màxima, en m; Tp: període de pic, la duració del grup d'ones amb més energia, es mesura en segons (s); m/s. metres per segon, per a la velocitat del vent. hPa: hectopascal: 1 mil·libar, mesura de la pressió atmosfèrica. UTC: Temps Universal del meridià de Greenwich, totes les referències horàries van en aquestes unitats; per convertir a l'hora local de la serra d'Irta, com era hivern caldria sumar una hora.

Resultats

Efecte de la borrasca Glòria sobre els blocs mesurats al 2018

L'estudi morfomètric de blocs a la costa d'Irta (Roig-Munar et al. 2018b) va escollir els blocs més grans i més allunyats de la línia de costa, i els que morfològicament presentaven les característiques sedimentàries d'imbricació i orientació en forma de cordons o en agrupacions similars als analitzats a la Mediterrània occidental (Lario et al. 2017; Vella et al. 2011; Roig-Munar 2016). En base al treball de camp realitzat un cop acabada la borrasca Glòria a les àrees analitzades en 2018 es comprova que cap dels blocs analitzats, i que es disposen en forma de cordons imbricats i orientats, han estat desplaçats en major o menor mesura pels efectes de la tempesta provocada pel Glòria. Així



FIGURA 3. Blocs de tsunami al pla de Roda (serra d'Irta), comparança temporal. **A:** foto del 31/05/2018 (Roig-Munar et al., 2018b: 17; Fig. 4A. **B:** foto del 18/02/2020, després de la tempesta Glòria.

Tsunami boulders in the Roda plain (Irta mountain range), temporary comparison. **A:** photo from 31/05/2018 (Roig-Munar et al., 2018b: 17; Fig. 4A. **B:** photo from 18/02/2020, after the storm Glòria.

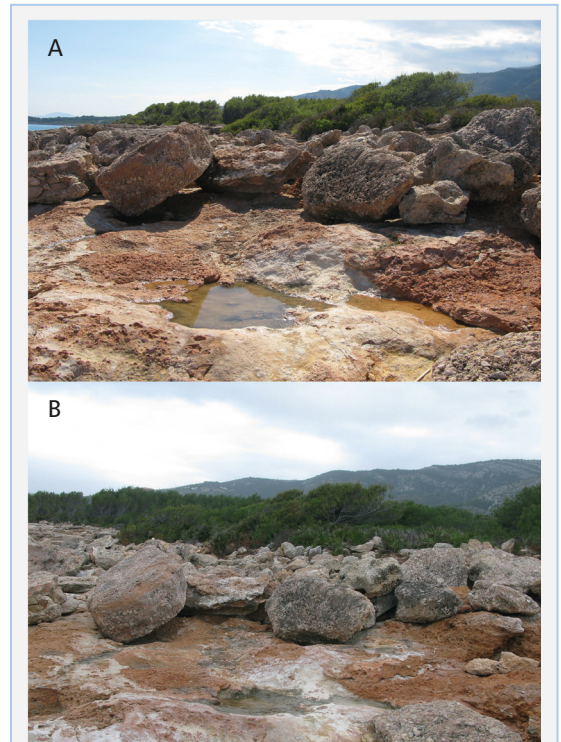


FIGURA 4. Blocs de tsunami al pla de Roda (serra d'Irta), comparança temporal. **A:** foto del 31/05/2018 (Roig-Munar et al., 2018b: 17; Fig. 8A. **B:** foto del 18/02/2020, després de la tempesta Glòria.

Tsunami boulders in the Roda plain (Irta mountain range), temporary comparison. **A:** photo from 31/05/2018 (Roig-Munar et al., 2018b: 17; Fig. 8A. **B:** photo from 18/02/2020, after the storm Glòria.



FIGURA 5. Blocs de tsunami a cala Basseta (serra d'Irta), comparança temporal. **A:** foto del 31/05/2018 (de Roig-Munar et al., 2018b: 17; Fig. 4B, A). **B:** foto del 05/03/2020, després de la tempesta Glòria.

Tsunami boulders in Cala Basseta (Serra d'Irta), temporary comparison. **A:** photo from 31/05/2018 (by Roig-Munar et al., 2018b: 17; Fig. 4B, A). **B:** photo from 05/03/2020, after the storm Gloria.



FIGURA 6. Blocs de tsunami a cala Argilaga (serra d'Irta), comparança temporal. **A:** foto del 31/05/2018 (de Roig-Munar et al., 2018b: 11; Fig. 4B, B). **B:** foto del 05/03/2020, després de la tempesta Glòria.

Tsunami boulders in Cala Argilaga (Serra d'Irta), temporary comparison. **A:** photo from 31/05/2018 (by Roig-Munar et al., 2018b: 11; Fig. 4B, B). **B:** photo from 05/03/2020, after the storm Gloria

mateix les bases dels blocs imbricats que formen cordons tampoc s'han vist afectades pel desplaçament de base que dona lloc a la modificació de la imbricació i orientació d'aquests blocs al llarg del temps (Roig-Munar 2016). La tempesta no ha exercit modificació de l'estructura sedimentària analitzada prèviament, i ha conservat la seva estructura i orientació (Fig. 3). En canvi, alguns blocs de mida petita que estaven en l'entorn del blocs més grans, generalment a la seua part frontal, i més propers a la línia de costa, van ser desplaçats pel temporal de gener de 2020, com es pot apreciar a les Fig. 3 a 6, tractant-se de blocs de petit ordre, alguns provinents de fragmentacions d'altres blocs no localitzats. Alguns blocs de mida petita i que no formen part dels cordons (Fig. 4 i 5) han desaparegut direcció a mar possiblement, associat als processos de retorns de flux de tempesta. També s'ha observat que s'ha desplaçat lateralment un bloc de

considerables dimensions (Fig 6), però que malgrat aquest desplaçament no presenta patrons d'imbricació ni estructura comparables amb els cordons o agrupacions de blocs imbricats, així com tampoc s'ha pogut localitzar la seva posició original. Dels blocs analitzats destaquen tan sols tres blocs que presenten desplaçament, tots ells blocs horitzontals sustentats sobre la terrassa litoral, presentant una major exposició a la massa d'aigua. Cap d'aquests blocs analitzats presenten imbricació i la seva disposició sobre la plataforma no respon a cap patró sedimentològic de flux continu, si no a un patró propi de tempestes, amb una distribució poc organitzada associada a la zona de *run-up* de tempestes (Roig-Munar et al. 2017). Dos d'aquests blocs s'han desplaçat horitzontalment 1,3 m, no afectant els cordons, ja que es troben en la part frontal d'aquests, i un d'ells presenta un moviment vertical de 0,3 m.

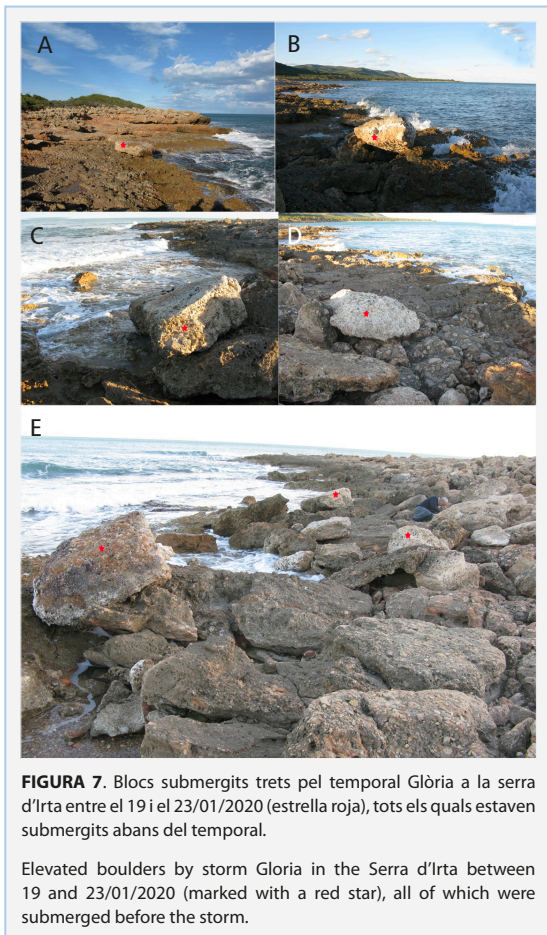


FIGURA 7. Blocs submergits tret pel temporal Glòria a la serra d'Irta entre el 19 i el 23/01/2020 (estrella roja), tots els quals estaven submergits abans del temporal.

Elevated boulders by storm Gloria in the Serra d'Irta between 19 and 23/01/2020 (marked with a red star), all of which were submerged before the storm.

Blocs submergits desplaçats pel temporal Glòria

De les dades obtingudes amb el treball de camp es desprèn que la tempesta Glòria ha tret alguns blocs submergits sobre les terrasses, blocs que presenten característiques morfomètiques d'arrodoniment, d'haver sortir recentment i que presenten adherits incrustants, alguns encara amb les parts toves, com ara: algues, *Arca noae* Linné 1758, *Lithophaga lithophaga* Linné 1758 i *Mytilus galloprovincialis* Lamarck 1819, les quals presenten dípters sobre els material orgànic.

Les mesures morfomètriques d'aquests blocs es recullen a la Taula 2. Els blocs submergits (Fig. 7) són 6 i presenten uns trets morfològics comuns:

Els valors obtinguts amb el seu Transport Figure suposen una mitjana de 2,07, un valor molt per davall dels valors establerts com a tsunami per Scheffers & Kelletat (2003) i fins i tot pels valors de TF de 58, 38 obtinguts al 2018.

L'aplicació de l'equació hidrodinàmica de Nott (2003) per blocs submergits ens ofereix que la columna d'aigua per treure blocs submergits és de 2,78 m d'alçada d'ona al contacte amb el bloc, un cop l'ona trenca a la zona submergida, molt inferior a les dades obtingudes al treball de 2018 que estimava columnes d'aigua o *run-up* per l'arrabassament i disposició de cordons de 3,01 m en el cas de tsunamis i de 4,31 en el cas de tempestes. Aquesta equació estableix valors per tempestes, que presenten valors de velocitat i fregament inferiors al flux de tsunami.

Els blocs es presenten aïllats sense patrons de deposició, no presenten cap imbricació, orientació, agrupació ni formes de morfologies en cordons i/o agrupacions, tractant-se d'àrees amb dispersió aleatòria de blocs de petit ordre.

Els blocs es disposen, un cop trets i dipositats, amb posició horitzontal o subhoritzontal, no disposant-se en les formes precedents atribuïdes a cordons de tsunamis, per la qual cosa no es pot mesurar la seva orientació. La seva disposició sobre la costa presenta preferència a les zones de *over wash*, possiblement ja condicionades a la seva batimetria mitjançant canals associats a erosions o fracturació i/o a petites entrades.

Els blocs estan més pròxims a la línia de mar, molt més baixos que els mesurats prèviament, i la seva posició final es troba associada sobre les plataformes denudades, on possiblement si aquestes presentessin rugositats els blocs no haguessin avançant tan terra endins.

Els blocs submergits identificats es troben a una distància de 4,2 m de la línia de costa, mentre que els que va estudiar Roig-Munar et al. (2018b) la distància és de 16 m, quatre vegades més (Taula 1).

Els blocs es troben dipositats a 0,7 m d'elevació s.n.m., que en comparança amb els blocs assignats a tsunamis per Roig-Munar et al. (2018b) estan a una mitjana de 2,6 m s.n.m., suposant el quàdruple de la distància (Taula 2). Aquests blocs es troben sobre una franja paral·lela a la línia de costa que no presenta patrons propis de fluxos de gran energia, si no que podrien ser la zona de deposició continua al llarg del temps de blocs de tempesta (Fig. 7).

La cornisa del penya-segat no s'ha vist afectada per l'arrabassament, trasllat i deposició de grans blocs, seguint el patró de l'origen dels blocs de tsunamis dels cordons de l'àrea. Sols s'identifiquen de forma aïllada alguns arrencaments d'escassa potència que es troben condicionats per fracturació i focalitzats en el marge

de contacte amb la mar, però sense poder localitzar-lo, la qual cosa s'ha interpretat que el temporal amb el flux de retorn de l'onada l'ha arrossegat cap a l'interior de la mar.

Discussió

El temporal generat per la borrasca Glòria ha assolit xifres rècord, des que es tenen registres pel que fa a l'onada màxima, a l'ona significant i al pic de període. Ha representat un esdeveniment extrem per a la mar Balear. La duració de l'onatge extrem també va ser excepcional, amb més de 100 hores per damunt del lllindar d'excedència de les onades significants, que és l'indicador que mesura els episodis excepcionals.

Aquesta tempesta extrema no ha mogut cap dels blocs de la mostra que s'havien mesurat a les sis àrees definides i analitzades morfològicament en el treball de Roig-Munar et al. (2018b). Però sí que ha desplaçat blocs de petita mida associats a la zona d'inundació de l'onatge, amb menor força i més debilitada pel fregament entre la zona submergida i la plataforma (Fig. 3-6), així com per les debilitats que es donen entre els impactes de les ones de tempesta, que a l'anar carregades d'aire debiliten la força de l'ona.

El temporal generat per la Glòria ha tret blocs submergits, però que presenten uns trets morfològics característics que ens permeten diferenciar-los dels blocs elevats pels tsunamis:

Son blocs aïllats de mida variable (Fig. 7), no formen agrupacions o cordons ni presenten patrons de sedimentació o d'orientació que es puguin identificar amb fluxos de gran energia.

Es disposen en posició horitzontal o subhoritzontal i

no presenten per tant una alineació respecte la direcció de l'onada que els ha elevat.

De mitjana han quedat més prop de la línia de mar que la mitjana de la mostra que es va considerar que havien estat elevats per tsunami en el treball de Roig-Munar et al. (2018b).

Els blocs de mitjana presenten una elevació respecte al s. n. m. inferior al blocs de tsunami.

En conjunt, els aspectes morfològics analitzats en els dos estudis, el previ (Roig-Munar et al. 2018b), i el present, es confirmen com uns bons indicadors per discernir entre blocs moguts per grans tempestes i/o per tsunamis, ja que els patrons morfològics i sedimentaris són congruents amb els resultats analitzats per tempestes de grans dimensions a les illes Balears (Roig-Munar et al. 2017, Martín-Prieto et al. 2018), i els resultats morfològics associats a blocs de tsunami.

Les observacions i les mesures preses després de la tempesta extrema Glòria, venen a confirmar la hipòtesi que els blocs de la serra d'Irta corresponen a tsunamis, congruents amb les modelitzacions de les trajectòries de tsunamis provinents d'Algèria cap a les costes de Balears i les costes peninsulars.

Es descarta la possibilitat que els blocs descrits al 2018 puguin ser de tempesta, i es descarta, amb base a les dades morfològiques, resultat de la borrasca Glòria, i les dades de recurrència d'esdeveniments de gran energia (Taula 1), que les tempestes, bé puntuals bé concatenades, siguin capaces de modificar les estructures sedimentàries d'aquesta tipologia de blocs alineats i orientats en forma de cordons.

S'arriba a la conclusió que en els camps de blocs a la serra d'Irta (Fig. 7E), es poden superposar elements

Núm.	Lloc	UTM	L1 m	L2 m	L3 m	DM	EM	Observacions
G1	Pla de Roda	31T 0272029/4461363	2,1	1,5	0,3	4	1	Submergit: I
G5	Cala Argilaga	31T 0272550/4461797	3,7	2,6	0,5	0	0,7	Submergit: I
G6	Cala Basseta	31T 0273316/4462842	1,4	1	0,3	7	1	Submergit: I
G7	Cala Basseta	31T 0273332/4462833	1,2	1	0,5	3	0,5	Submergit: I
G8	Cala Basseta	31T 0273317/4462820	1,2	0,5	0,5	5	0,5	Submergit: I
G9	Cala Basseta	31T 0273318/4462825	0,9	0,8	0,2	6	0,8	Submergit: I
	Mitjana/Mean	Glòria n: 6	1,7	1,2	0,4	4,2	0,7	Aquest estudi
	Mitjana/mean	Tsunamis n: 68	1,7	1,2	0,4	15,5	2,6	Roig-Munar et al.

TAULA 2. Blocs desplaçats per la tempesta Glòria a la costa rocosa de la serra d'Irta (el Baix Maestrat, País Valencià). DM: distància a la mar. HM: alçada sobre el nivell de la mar. I: presència d'incrustants i algues subaquàtiques; n. quantitat d'elements de la mostra. Totes les mesures en metres (m). Les dades del blocs de tsunami preses de Roig-Munar et al. (2018b).

Boulders displaced by storm Gloria on the rocky coast of the Sierra de Irta (the Baix Maestrat, País Valencià). DM: distance to the sea. HM: height above sea level. I: presence of crustaceans and underwater algae; n. number of items in the sample. All measurements in meters (m). Data from tsunami blocks taken from Roig-Munar et al. (2018b).

que tenen diversos orígens cronològics, ja que sobre una àrea d'escassa amplada i alçada, com són les terrasses rocalloses litorals de la serra d'Irta, es poden donar processos poligènics de tempestes i tsunamis que poden anar evolucionant morfològicament amb la disposició de la morfometria de blocs. Cada episodi de tsunamis i cada episodi extrem de tempesta pot haver modificat les característiques primogènites, que no tenen per què ser sincrònics, com s'ha descrit a les costes rocoses de baixa alçada de les illes Balears (Roig-Munar et al. 2016). En el cas analitzat d'Irta aquests esdeveniments poligènics ens ofereixen dues estructures diferenciades de blocs, uns associats a tempestes, resultat de una distribució de blocs dispersos sense patró i propers a la línia de costa, i altres a tsunami, amb una estructura d'imbricació, orientació i allunyats de la línia de costa i amb el mateix patró que els blocs analitzats a la Mediterrània occidental (Roig-Munar et al. 2020).

A la vista de les dades s'hauria de plantejar la reinterpretació de certes estructures sedimentàries properes a la costa com tsunamites, seguint el fil argumental de Roig-Munar et al. (2020), ja que a les costes sedimentàries associades als models de trajectòries de tsunamis a la Mediterrània Occidental hi ha escassos treballs sobre tsunamites (Reicherter & Becker-Heidmann, 2008). Hi ha la possibilitat que alguns nivells estudiats al País Valencià (Fumaral et al. 1993, Viñals et al. 1993, Sanjaume & Carmona 1995, Segura 1995, Segura et al. 1995) hagin estat interpretats com a temestites o com trencaments d'onatges extraordinaris, sense donar lloc a la interpretació de tsunamis. Viñals et al. (1993) parla de sediments gruixats associats a trencament de barres litorals, i Segura et al. (1995) esmenten acumulacions d'arenes de gra gruixat d'origen marí a les zones humides properes a Irta.

En base als resultats obtinguts al treball de 2018b i als resultats morfomètrics associats al Glòria, la seva relació a les recurrències de grans tempestes, la posició de la costa valenciana en relació a les trajectòries de tsunamis provinents d'Algèria i a les descripcions de sediments marins a zones humides als anys 1993 i 1995, cal obrir la porta a la reinterpretació sedimentària de les costes baixes properes als indrets de blocs de tsunamis, i fins i tot a la recerca de nivells de tsunamites sedimentàries de gra gruixut a zones humides.

Així mateix és interessant, seguint la línia d'Arteaga et al. (2015) incloure línies de recerca de esdeveniments de tsunamis als estudis d'arqueologia que es

desenvolupin a les zones litorals del País Valencià.

També caldria realitzar anàlisis de datacions de blocs i de possibles tsunamites, ja que obtindríem períodes de recurrència d'esdeveniment de tsunami i la seva relació amb les datacions de blocs de la Mediterrània occidental.

Bibliografia

- AEMET (Agencia Estatal de Meteorología) 2020.** www.aemet.es (Consultada el 25 d'abril de 2020).
- 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.
- Amores, A., Marcos, M., Carrió, D. S. & Gómez-Pujol, L. 2020.** Coastal Impacts of Storm Gloria (January 2020) over the Northwestern Mediterranean. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. <http://doi.org/10.5194/nhess-2020-75>.
- Arteaga, C., Blánquez, J. & Roldán, L. 2015.** Consideraciones paleogeográficas en la bahía de Algeciras. Acerca de un posible tsunami en la Cateria romana de San Roque, Cádiz. *Cuaternario y Geomorfología*, 29 (1): 137-156.
- Bianchi, C. N. 2007.** Biodiversity issues for the forthcoming tropical Mediterranean sea. *Hidrobiología*, 580:7-21.
- Cañellas, B., Orfila, A., Méndez, F. J., Menéndez, M. & Tintoré, J. 2007.** Application of a POT model to estimate the extreme significant wave height level surround the Balearic Sea (Western Mediterranean). *J. Coastal Research SI 50*, 329–333.
- Cox, R., O'Boyle, L. & Cytrynbaum, J. 2019.** Imbricated coastal boulder deposits are formed by storm waves, and can preserve a long-term storminess record. *Sci. Rep.*, 9: 10784.
- Cox, R. 2020.** Megagravel deposits on the west coast of Ireland show the impacts of severe storms. *Weather*, 75(3): 72-77.
- 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 Martina 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.
- 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.
- Fumaral, M. P., Mateu, G., Rey, J. Somoza, L. & Viñals, M. J. 1993.** Las unidades morfosedimentarias cuaternarias del litoral del Cap de la Nau (Valencia-Alicante) y su correlación con la plataforma continental. En: *Estudios sobre Cuaternario: Medios sedimentarios, cambios ambientales, hábitat humano*. Ed. Fumaral M. P. i Bernabeu, J. Univ de València: 53-64.
- Gili, J. M. 2001.** Biodiversitat marina mediterrània. *L'Atzavara*, 9: 25-35.
- Guillén, J. 2020.** Impacte sobre la franja litoral. En Berdalet, E., Marrasé, C. i Pelegrí, J. L. (eds.). *Resum sobre la informació i conseqüències de la Borrasca Gloria (19-24 gener 2020)*. Institut de Ciències del Mar, CSIC. 20 març de 2020, 38 pp. DOI: 10.20350/digitalCSIC/12496.
- 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.

- Martín-Prieto, J. Á., Rodríguez-Perea, A., Roig-Munar, F. X. & Gelabert, B. 2018.** Accumulation of boulders on the South coast of Mallorca (s'Estalella) from a sea storm. En: Garcia, C., Gómez-Pujol, L., Morán-Tejeda, E., Batalla, R.J. (eds). *Geomorfología del Antropoceno. Efectos del cambio global sobre los procesos geomorfológicos*. UIB, SEG, Palma.
- Reicherter K. & Becker-Heidmann, P. 2008.** Tsunamites in lagunas: remains of the 1522 Almería earthquake (western Mediterranean). 2nd International Tsunami Field Symposium IGCP Project 495 Quaternary Land-Ocean Interactions: Driving Mechanisms and Coastal Responses Ostuni (Italy) and Ionian Islands (Greece), 127-129 pp.
- 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. Tesi doctoral, Departament de Geodinàmica i Geofísica, Universitat de Barcelona, 410 pp.
- Roig-Munar, F. X., Forner, E., Gual, V., Martín-Prieto, J. Á., Segura, J. Rodríguez-Perea, A., Gelabert, B. & Vilaplana, J. M. 2019.** Els blocs de tsunamis de la costa rocosa de la serra d'Irta (el Baix Maestrà): una proposta com a LIG (Lloc d'Interès Geològic). *Nemus*, 9: 195-210.
- Roig-Munar, F. X., Forner, E., Martín-Prieto, J. Á., Rodríguez-Perea, A., Gelabert, B. & Vilaplana, J. M. 2018a.** Bloques indicadores de tsunamis en las costas rocosas de la serra d'Irta (Castelló, País Valencià). En: Garcia, C., Gómez-Pujol, L., Morán-Tejeda, E., Batalla, R.J. (eds). *Geomorfología del Antropoceno. Efectos del cambio global sobre los procesos geomorfológicos*. UIB, SEG, Palma. *Geo-Temas*, 18, 172-176.
- Roig-Munar, F. X., Forner, E., Martín-Prieto, J. A., Segura, J., Rodríguez-Perea, A., Gelabert, B. & Vilaplana, J. M. 2018b.** Presència de blocs de tsunamis i tempestes a les costes rocoses de la serra d'Irta (el Baix Maestrà, País Valencià). *Nemus*, 8:7-28.
- Roig-Munar, F. X., Martín-Prieto, J. Á., Rodríguez-Perea, A., Gelabert Ferrer, B., Vilaplana Fernández, J. M. & Garcia-Lozano, C. 2020.** Tsunami deposits, blocks and tsunamites on the coasts of the western Mediterranean. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, en premsa.
- Roig-Munar, F. X., Martín-Prieto, J. A., Rodríguez-Perea, A., Gelabert Ferrer, B. & Vilaplana Fernández, J. M. 2017.** 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., Vilaplana, J. M., Rodríguez-Perea, A., Martín-Prieto, J. A. & Gelabert, B. 2016.** Indicadores geomorfológicos de tsunamis históricos en las costas rocosas de Baleares. *Geo-Temas*, 16 (1): 641-64.
- Puertos del Estado 2020.** www.puertos.es (Consultada el 23/04/2020).
- Sanjaume, E. & Carmona, P. 1995.** L'Albufera de València: rasgos geomorfológicos y evolución cuaternaria. En: *El cuaternario del País Valenciano*. Ed. Universitat de València, 155-162.
- Segura, S. 1995.** El Cuaternario continental en las tierras septentrionales valencianas. En: *El cuaternario del País Valenciano*. Ed. Universitat de València, 83-96.
- Segura, F., Sanjaume, E. & Pardo, J., 1995.** Evolución cuaternaria de las albuferas del sector septentrional del Golfo de Valencia. En: *El cuaternario del País Valenciano*. Ed. Universitat de València, 139-153.
- 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.
- Scheffers, A. & Kelletat, D. 2003.** Sedimentologic and geomorphic tsunami imprints worldwide - a review. *Earth-Science Review*, 63: 83-92.
- Vella, C., Demory, F., Canut, V., Dussouillez, P. & Fleury T. J. 2011.** First evidence of accumulation of mega boulders on the Mediterranean rocky coast of Provence (southern France). *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 11: 905-914.
- Viñals, M. J., Belluomini, G., Fumaral, M. P., Dupré, Usera, J., Mestres, J. & Manfra, L. 1993.** Rasgos paleoambientales holocenos en la bahía de Xàbia (Alicante). En: *Estudios sobre Cuaternario: medios sedimentarios, cambios ambientales, hábitat humano*. Ed. Fumaral M. P. i Bernabeu, J. Univ de València: 107-114.

Agraïments. A Puertos del Estado, per facilitar i cedir les dades corresponents a l'episodi de la borrasca Glòria.