

# Temporals marins extrems a Formentera: caracterització i situacions sinòptiques

Lluís GÓMEZ-PUJOL

## SHNB



SOCIETAT D'HISTÒRIA  
NATURAL DE LES BALEARS

Gómez-Pujol, L. 2015. Temporals marins extrems a Formentera: caracterització i situacions sinòptiques *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 58: 17-26. ISSN 0212-260X. Palma de Mallorca.

S'analitzen les dades dels esdeveniments extrems de condicions de mar de 3 punts SIMAR al voltant de l'illa de Formentera pel període 1958-2011. Les sèries temporals posen de manifest la recurrència de tempestes de mar amb altures d'ona significant part damunt dels 5 m cada dos anys, a la vegada que destaquen esdeveniments part damunt dels 10 metres el 1980 i el 2002. La durada dels esdeveniments màxims anuals és variable, tot i que són habituals els fenòmens de 12 a 18 hores de durada amb altures d'ona part damunt dels 2m durant més de 6 hores seguides. Els temporals més energètics procedeixen del NNE i estan lligats als ciclons mediterranis amb baixes pressions entre Balears i Sardenya.

**Paraules clau:** *temporals marins, clima marítim, situacions sinòptiques, risc.*

SEA STORM EXTREME EVENTS AT FORMENTERA: MAIN FEATURES AND RELATED SYNOPTIC SITUATIONS. Sea storm maximum annual events have been characterized by analysing storm data set, which comprises 3 SIMAR points during the period 1956-2011. Time series show that each two years Formentera suffers sea storms of 5m in significant wave height. Additionally we have identified the two largest sea storms since 1956, with wave heights above 10 meters in 1980 and 2002. The surge duration tend to be between 12 and 18 hours of waves larger than 2m in heights. The most energetic surges proceed from NNE and are related to mediterranean cyclones situations, characterized by a low pressure centre between Balearic Islands and Sardinia.

**Keywords:** *sea storms, maritime climate, synoptic situations, hazard.*

Lluís GÓMEZ-PUJOL, SOCIB, Balearic Islands Coastal Observing and Forecasting System. ParcBIT, Ed. Naorte, Ctra. Valldemossa km 7.4, 07121 Palma (Illes Balears). E-mail: [lgomez-pujol@socib.cat](mailto:lgomez-pujol@socib.cat).

*Recepció del manuscrit: 23-nov-14; revisió acceptada: 30-abr-15*

## Introducció

Els temporals poden definir-se, d'una forma senzilla i sense entrar en massa detalls, com una pertorbació atmosfèrica acompanyada de forts vents entre d'altres elements. Quan aquesta pertorbació afecta la mar, un dels efectes immediats és un increment de l'altura d'ona i, de vegades, del nivell marí (*storm surge*). Aquests

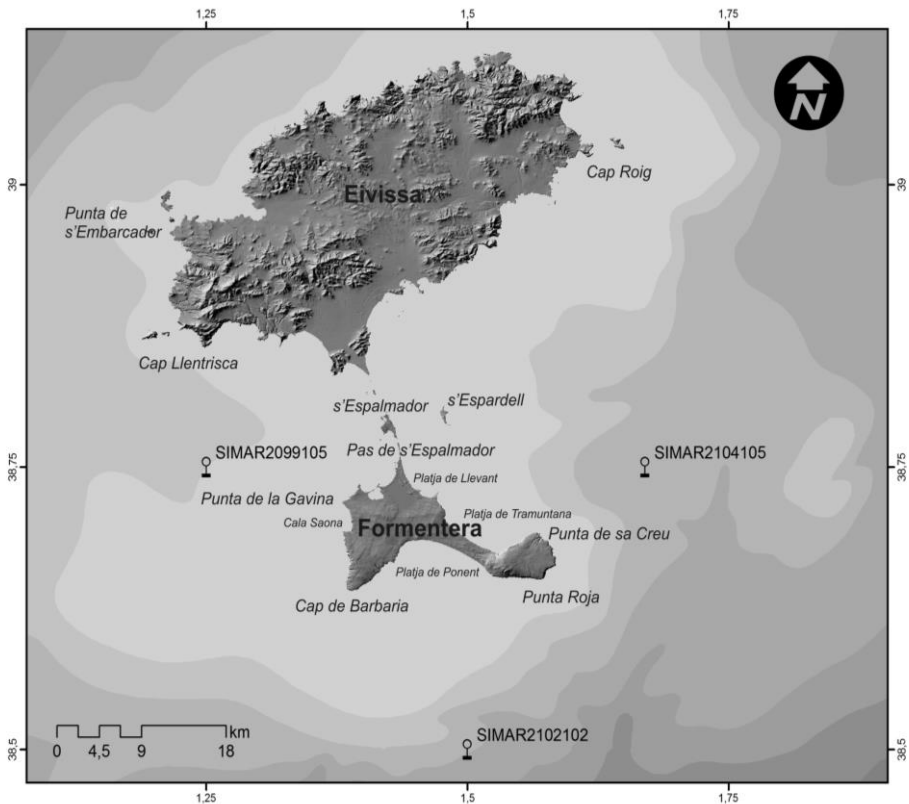
fenòmens tenen importants conseqüències per als sistemes costaners, que poden traduir-se en l'erosió de les platges i les dunes, la inundació de les zones deprimides i també en danys en els hàbitats, les infraestructures o les edificacions, entre molts d'altres (Nott, 2006).

La magnitud d'aquests processos i les respostes són proporcionals a la seva energia. En aquest sentit, temporals

energètics poden accelerar les taxes d'erosió de la línia de costa i condicionar les possibilitats de recuperació del sistema costaner (Morton i Sallenger, 2003; Gómez-Pujol *et al.*, 2011).

Tant és així que el protocol per a la Gestió Integrada de les Zones Costaneres de la Mediterrània (PAP/RAC, 2007), signat el 2008 pels Estats Membres de la UE, inclou un capítol dedicat als riscos naturals i recomana l'avaluació de la perillositat i el risc de les zones costaneres per tal d'adoptar mesures de prevenció i mitigació envers els desastres naturals.

A les Illes Balears comptam amb algunes contribucions, tot i que minses, a propòsit del clima marítim i el règim extremal. Canyellas (2010), a la seva tesi, quasi bé no aborda l'apartat descriptiu i regional de l'onatge i els esdeveniments extrems. Per contra, centra el gruix de la seva tasca en mètodes per a la caracterització del règim extremal (Cañellas *et al.*, 2007; en l'estudi de les teleconnexions del règim extremal del Golf de Lleó amb la NAO (Cañellas *et al.*, 2010b) o la predicció de l'onatge a partir d'algoritmes genètics (Cañellas *et al.*, 2010a).



**Fig. 1.** Àrea d'estudi i localització dels punts SIMAR emprats a l'estudi.  
*Fig. 1.* Study area and location of SIMAR points used in the analysis.

Així les coses, l'objectiu del present treball és identificar els esdeveniments extrems anuals a cada una de les façanes marítimes de l'illa de Formentera durant els darrers 53 anys (1958-2011) i caracteritzar-ne els principals atributs i les situacions sinòptiques associades.

## Materials i mètode

### *Àrea d'estudi*

L'illa de Formentera, juntament amb s'Espalmador, són les dues illes més meridionals del subarxipèlag pitius. A 7 km de la Punta de la Torre de les Portes, es diposa amb una superfície aproximada de 83km<sup>2</sup> i una llargària de 18km (Servera, 1999).

Des d'un punt de vista fisiogràfic l'illa té una forma allargada, lleugerament triangular (Fig. 1). A ponent l'accident del Puig Guillem marca la posició d'un dels puntals fini-miocènics (Tortonà superior) sobre els que descansa l'illa, a partir del qual les dunes quaternàries construïren un cordó que, a mode de tómbol, lliga amb l'altre promontori de l'illa: la Mola, també construïda pels materials del Miocè superior (Costa *et al.*, 1985).

Així doncs, l'illa de Formentera presenta tres façanes marines: a ponent, des de la Punta des Trabucador –al pas de s'Espalmador– fins al Cap de Barbaria queda la façana occidental de l'illa. Del mateix cap estant fins a la Punta Roja hi tenim la façana meridional, tot aprofitant l'amfiteatre de la Platja de Migjorn–Ponent. Finalment, protegida per l'illa d'Eivissa i orientada a gregal, resta la façana nord-est.

### *Dades d'onatge*

La identificació dels esdeveniments de temporal marí s'ha realitzat a partir de les dades del projecte HIPOCAS (Guedes-

Soares, 2008) i el seu manteniment i ampliació per Puertos del Estado a la xarxa de punts de dades històriques d'onatge SIMAR. Les dades utilitzades en el present estudi consisteixen en sèries temporals d'onatge simulades (altura, període i direcció d'ona) a una freqüència de tres hores, que han estat sotmeses a processos de reanàlisi i calibració (Jiménez *et al.*, 2012). Els punts seleccionats per dur a terme l'anàlisi de les sèries temporals han estat el SIMAR2099105 per a la façana occidental de l'illa, el SIMAR2102102 per a la meridional i el SIMAR2104105 per a la façana nord-oriental. Els dos primers nodes tenen un abast temporal per al període 1958-2011, mentre que el darrer sols aporta dades per al període 1996-2011.

### *Definició de temporal marí*

D'entre els diferents mètodes a l'ús per a la caracterització dels temporals s'ha optat pel mètode dels màxims anuals (Mendoza *et al.*, 2011; Jiménez *et al.*, 2012). Aquest consisteix en la determinació dels valors màxims d'altura d'ona per a intervals d'un any. Així doncs, per a la construcció d'una sèrie temporal d'extrems màxims anuals de tempestes marines, s'han considerat aquells esdeveniments que han superat els 2m d'altura significativa d'ona (Hs) de forma ininterrompuda durant un mínim de 6 hores (Mendoza *et al.*, 2011). L'interval de 6 hores permet determinar la duració mínima del temporal, ja que és lògic que durant un mateix esdeveniment, ni totes les ones siguin iguals, ni superin el llindar d'altura establert. Així, si durant les 6 hores l'altura d'ona és igual o major a 2 m, el temporal no ha acabat. En canvi, si l'altura d'ona descendeix per sota dels 2 m durant més de 6 hores, llavors es considera que el temporal ha acabat. Aquest filtre permet assegurar-se que s'han seleccionat esdevé-

niments diferents i la independència de les sèries temporals.

Els punts SIMAR es troben a mar oberta, per la qual cosa reben onatge de direccions que en realitat no afecten les costes de Formentera, bé perquè l'illa d'Eivissa actua de barrera protectora, bé perquè la pròpia illa de Formentera fa un efecte d'ombra per a l'onatge del sud als nodes del nord i viceversa. Així doncs, s'ha realitzat una restricció de la direccionalitat d'onatge i s'han exclòs aquells registres corresponents a les zones d'ombra de cada punt.

Així, el punt SIMAR2099105 per a la façana occidental de l'illa exclou les direccions compreses entre 45° i 135°; el SIMAR2102102, per a la façana sud, abasta les direccions entre 25° i 325° i, finalment, el SIMAR2104105, per a la façana nord-oriental, rep la influència de l'onatge procedent entre 0° i 210°.

El procés de selecció dels temporals i dels màxims, així com de les variables de període, durada, direcció, velocitat del vent i direcció del vent, s'ha dut a terme mitjançant un codi desenvolupat en el programari MATLAB®.

## Resultats

### *Evolució dels temporals entre 1958 i 2011*

La Fig. 2 presenta les sèries d'altura d'ona significant màxima anual per als cinquanta-tres anys d'estudi i per a cada una de les façanes marítimes de l'illa de Formentera. No s'observa cap tendència temporal significativa en l'altura dels esdeveniments màxims (Taula 1), tot i que per al període 1960-1990 sembla que es doni una alternança d'anys amb tempestes més energètiques i menys energètiques, tot i que dins del rang entre els 3 i 6m i amb períodes de 8 a 12s. Tampoc s'observa cap

Punt SIMAR	1958 - 2011	
	Pendent	r <sup>2</sup> (probabilitat)
2099105	-0.010	0.003 ( $p>0.05$ )
2102102	-0.004	0.002 ( $p>0.05$ )
2104105*	-0.090	0.033 ( $p>0.05$ )

**Taula 1.** Anàlisi de regressió de les sèries temporals i significació del valor d'ajust dels mínims quadrats. \* Per a 2104105 la sèrie just abraça de 1996 a 2011.

**Table 1.** Time series regressions analysis. Slope is calculated by least squares fitting and the associated statistically significant p-value. \* The time period for 2104105 is from 1996 to 2011.

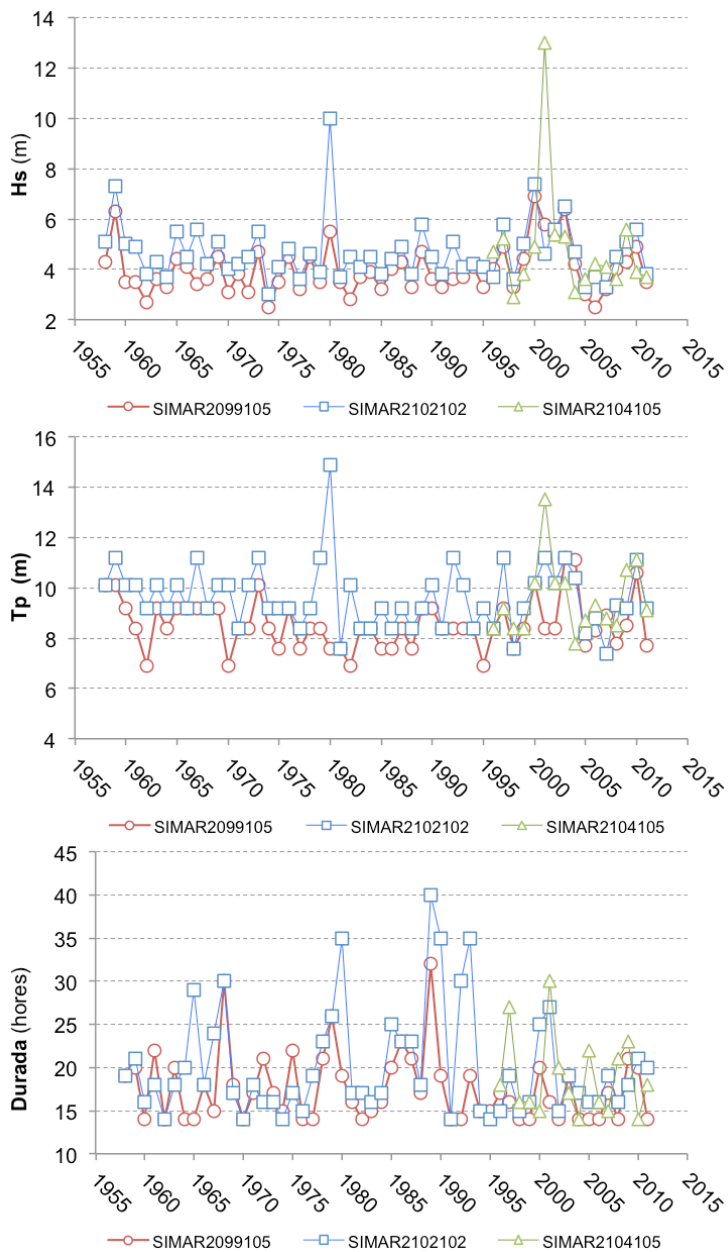
tipus de tendència pel que fa a la procedència dels temporals o de la seva durada durant el període d'estudi (Fig. 2).

### *Característiques dels temporals*

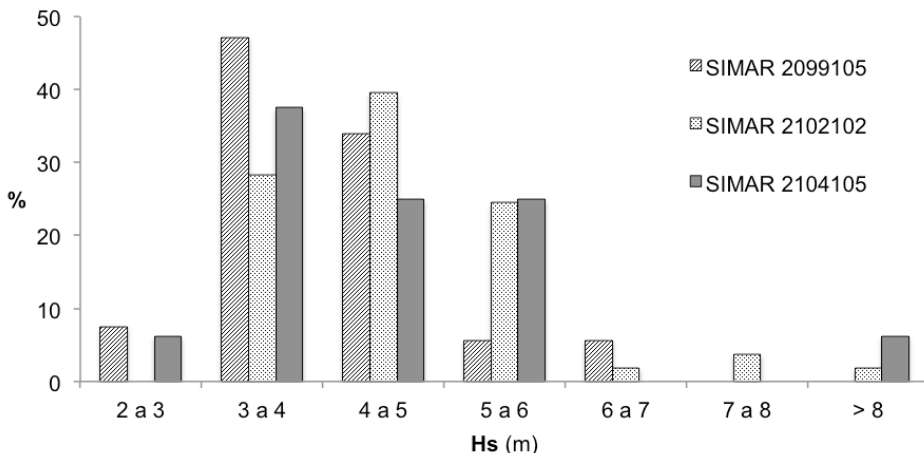
Els valors d'altura màxima per al període 1958-2011 oscil·len entre 3 i 6 metres (Fig. 3). Localment s'observen valors amb un màxim de 10m per a 1980 i de 13m per a 2001, corresponent el primer a la façana meridional i el segon a l'oriental, que és l'única directament exposada als vents i onatges del primer quadrant.

Com es pot observar tant a la sèrie temporal de la Fig. 2 com a l'histograma d'altures màximes anuals de la Fig. 3, no hi ha diferències significatives quant a la magnitud dels temporals de les façanes marines, si bé hi ha una lleugera asimetria en la distribució dels valors d'altura, que es tradueix en esdeveniments un poc més energètics a llevant i migjorn, mentre que a ponent són menys intensos.

Pel que fa al període d'ona associat a cada un dels esdeveniments màxims anuals, també es reproduïx l'esquema regional descrit per a l'altura d'ona. Així, els valors corresponents als punt 2102102 i 2104105 tendeixen a ser lleugerament superiors als de 2104105.



**Fig. 1.** Sèries temporals d'altura d'ona significant, període i durada del temporal marí.  
**Fig. 1.** Time series of wave significant height, period and storm duration.

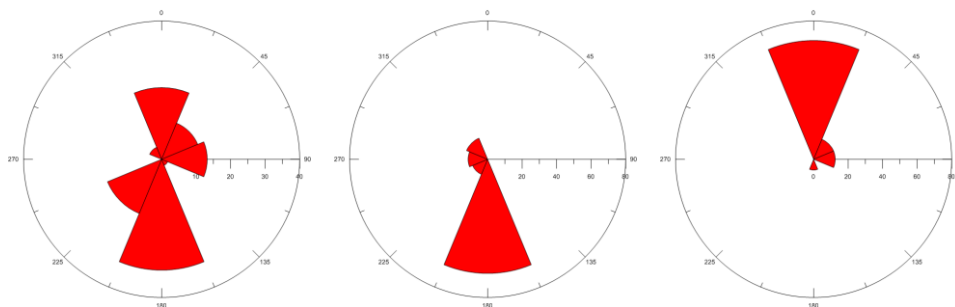


**Fig. 3.** Histograma de l'altura d'ona significativa de l'esdeveniment màxim anual.

**Fig. 3.** *Frequencies of wave significant height from maximum annual events.*

També s'ha recollit la direcció de propagació de l'onatge durant el període d'estudi (Fig. 4). Els esdeveniments d'onatge màxim anuals tenen una clara component sud al punt SIMAR2102102, el 40% dels temporals provenen d'aquesta direcció. Com també passa a ponent amb el punt SIMAR2099105, tot i que amb una proporció menor (25%), perquè a través del corredor que suposa el canal des Freus hi

arriben els onatges de nord i nord-nordest (ca. 20%) dels quals l'illa d'Eivissa no el protegeix. Pel que fa a la façana oriental de Formentera, punt SIMAR 2104105, les direccions dels esdeveniments màxims anuals tenen una abassegadora component del primer quadrant (60 %) amb una marcada presència dels onatges de tramuntana i amb menor mesura dels de gregal (Fig. 4).



**Fig. 4.** Rosa de direccions dels esdeveniment màxims anuals: SIMAR2099105 (esquerra), SIMAR2102102 (centre) i SIMAR2104105 (dreta).

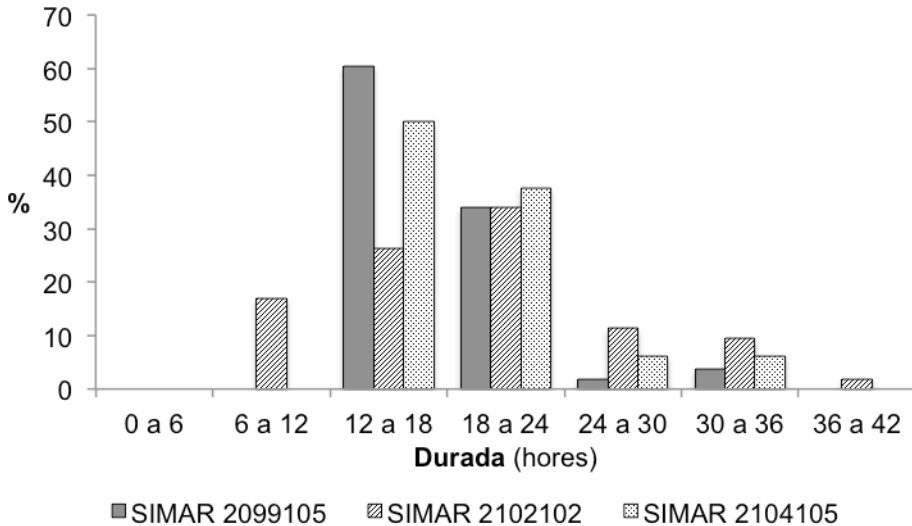
**Fig. 4.** *Maximum annual event rose directions: SIMAR 20999105 (left), SIMAR 2102102 (centre) and SIMAR2104105 (right).*

Pel que fa a la durada dels esdeveniments, entesa com el temps que passa d'ençà que una ona supera l'altura de 2m fins que torna a registrar un valor inferior després de 6 hores part damunt d'aquest límit, crida l'atenció el contrast entre façanes marítimes. A la Fig. 5 es pot apreciar com a les façanes oriental i meridional de Formentera els temporals tendeixen a ser més llargs que no pas a ponent, tot coincidint amb el que passa amb l'altura d'ona significativa (Fig. 3). Així, mentre a ponent els temporals duren entre 12 i 18 hores i poques vegades depassen les 20 hores, a migjorn i llevant, els esdeveniments màxims anuals arriben a durades entre 18 i 24 hores d'ones part damunt dels 2m d'Hs i no són estranys casos que es perllonguen més enllà de les 30 o 36 hores (Fig. 5). Si hom reprèn la sèrie temporal de la Fig. 2, val la pena de destacar que es poden diferenciar de forma nítida alguns períodes pel que fa a la durada dels temporals màxims anuals. Així doncs,

sembla que entre l'any 1969 i 1976 existí certa treva pel que fa a la intensitat i energia dels temporals, com també succeí entre el 1980 i el 1988. La primera meitat dels noranta és un període especialment conflictiu pel que fa a la persistència dels esdeveniments energètics i d'ençà del 2000 hi ha una certa irregularitat, tot i que sense arribar a la durada dels temporals extrems previs.

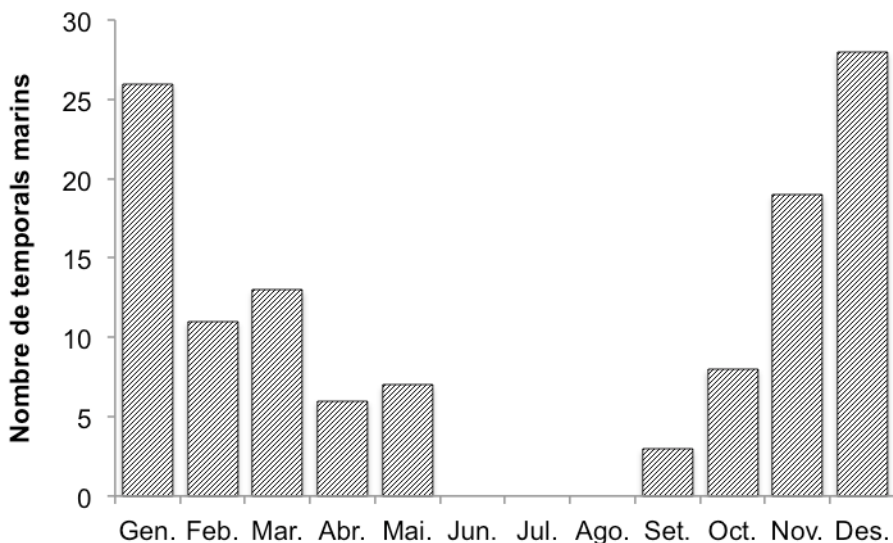
#### Estacionalitat

La figura 6 presenta la distribució estacional dels esdeveniments màxims anuals durant el període estudiat per al conjunt de les observacions fetes a l'illa de Formentera. Aquesta distribució posa de manifest l'existència d'una marcada estacionalitat amb un règim de temporals entre el setembre i el maig i un període de calma per als mesos de juny, juliol i agost. Els límits d'aquesta estació queden definits per mesos amb algun cas de temporal, tot i que amb altures d'ona i durades discretes



**Fig. 5.** Histograma de la durada dels esdeveniments màxims anuals.

**Fig. 5.** *Frequencies storm duration from maximum anual events.*



**Fig. 6.** Estacionalitat dels esdeveniments màxims anuals.

*Fig. 6. Maximum annual events seasonality.*

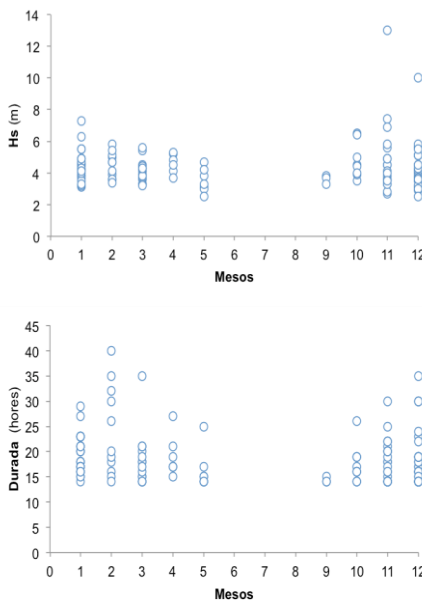
i d'escassa energia (Fig 7).

Les tormentes més energètiques i de durada més llarga es concentren des d'octubre a febrer, com també passa a les costes de Catalunya (Mendoza *et al.*, 2011). Aquesta és l'època de temporals que està associada al període de ciclogènesis més intenses que es dona a la conca mediterrània (Lionello *et al.*, 2006).

*Situacions sinòptiques*

Una vegada obtingut el llistat d'esdeveniments extrems s'han consultat els mapes sinòptics corresponents a les aplicacions de reanàlisi de l'*European Centre for Medium Weather Forecast (ECMWF)*. Bàsicament, s'observen tres configuracions tipus a les que van associades els esdeveniments extrems anuals: els ciclons mediterranis, les adveccions del sud i les adveccions de l'est.

Els ciclons mediterranis es caracteritzen per un centre de baixes pressions sobre l'oest de la Mediterrània (Fig. 8). Aquests



**Fig. 7.** Distribució estacional de l'altura d'ona significant i la durada dels temporals marins.

*Fig. 7. Seasonal patterns of wave significant height and storm duration.*



temporals poden presentar-se com a configuracions de mesoescala i baixa intensitat, o bé, poden cobrir una àrea de dimensions menors (Campins *et al.*, 2000). Són característics la ubicació d'una altra pressió sobre l'Atlàntic i una intensa depressió entre Balears i Sardènia (ca. 996 mb) on els vents bufen intensament de nord i gregal (Genovés *et al.*, 2006).

Per ordre d'importància en la generació dels temporals marins màxims anuals tenim les adveccions del sud (Fig. 8). Aquestes es caracteritzen per la presència d'una baixa pressió en el centre de l'Atlàntic que genera importants gradients de pressió en superfície que activen l'acció dels vents de component sud, tot i que amb direccions que poden oscil·lar de SE, S i SW (Campins *et al.*, 2011).

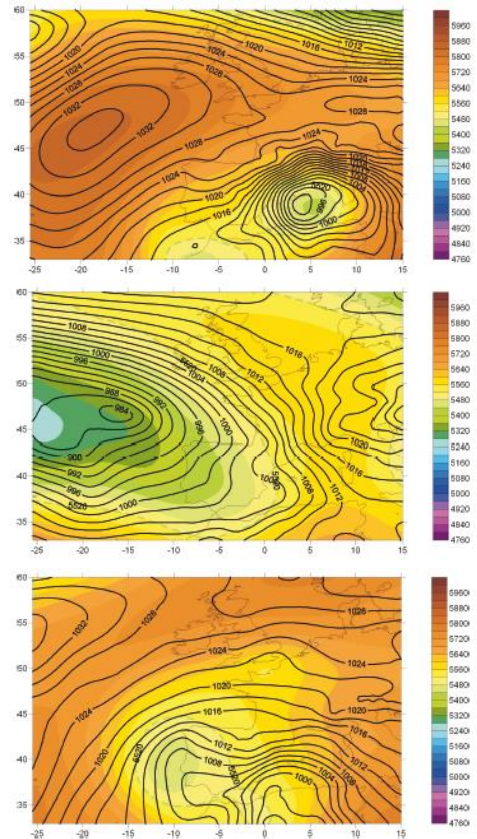
Finalment, el tercer grup de temporals estan associats a les adveccions de l'est i el seu tret distintiu consisteix en una alta pressió sobre el nord i el centre d'Europa i una baixa pressió sobre el nord d'Àfrica. Un dels seus efectes són vents que bufen des de l'Est (Mendoza *et al.*, 2011).

## Conclusions

S'analitzen les dades dels esdeveniments extrems de condicions de mar de 3 punts SIMAR al voltant de l'illa de Formentera del període 1958-2011.

Les sèries temporals posen de manifest la recurrencia de tempestes de mar amb altures d'ona significant part damunt dels 5m cada dos anys, a la vegada que destaquen esdeveniments part damunt dels 10 metres el 1980 i el 2002.

La durada dels esdeveniments màxims anuals és variable, tot i que són habituals els fenòmens de 12 a 18 hores de durada amb altures d'ona part damunt dels 2m durant més de 6 hores seguides.



**Fig. 8.** Situacions sinòptiques tipus en què es donen els temporals marins a Formentera. Els gràfics procedeixen de l'European Centre for Medium Weather Forecast (ECMWF), les isolínies fan referència a la pressió en superfície i l'escala de color a la pressió en altura (500). Situació de Ciclò Mediterrani (superior) per a l'11/11/2001 a les 06:00h UTC. Situació d'advecció del sud (centre) el 22/12/2000 a les 12:00h UTC. Situació d'advecció de l'est corresponent al 7/5/2002 a les 12:00h UTC.

**Fig. 8.** Formentera sea storms related synoptic situations. Graphs from European Centre for Medium Weather Forecast (ECMWF), lines sea level pressure and colour height pressure (500). Mediterranean cyclone (upper) 11/11/2001 at 06:00h UTC. South advection (centre), 22/12/2000 at 12:00h UTC. East advection 7/5/2002 at 12:00h UTC.

Els temporals més energètics procedeixen del NNE i estan lligats als ciclons mediterranis amb baixes pressions entre Balears i Sardenya. Per aquest motiu, l'ocurrència de les temporals marins té una marcada estacionalitat i és més recurrent els mesos d'octubre a febrer.

## Agraïments

A Puertos del Estado per facilitar les dades del punts SIMAR i a l'ECMWF per l'accés i consulta dels mapes de situacions sinòptiques del projecte ERA.

## Bibliografia

- Campins, J., Genovés, A., Jansà, A., Guijarro, J.A. i Ramis, C. 2000. A catalogue and classification of surface cyclones for the Western Mediterranean. *Journal of Climatology*, 20: 969-984.
- Campins, J., Genovés, A., Picornell, M.A. i Jansà, A. 2011. Climatology of Mediterranean cyclones using the ERA-40 dataset. *International Journal of Climatology*, 31: 1596-1614.
- Cañellas, B. 2010. *Long-term extreme wave height events in the Balearic Sea: Characterization, variability and prediction*. Tesi Doctoral. Institut Mediterrani d'Estudis Avançats, Universitat de les Illes Balears. Palma. 84 pp.
- Cañellas, B., Balle, S. i Tintoré, J., Orfila, A. 2010. Wave height prediction in the Western Mediterranean using genetic algorithms. *Ocean Engineering*, 37: 742-748.
- Cañellas, B., Orfila, A., Méndez, F.J., Álvarez, A. i Tintoré, J. 2010. Influence of the NAO on the northwestern Mediterranean wave climate. *Scientia Marina*, 74: 55-64.
- Cañellas, B., Orfila, A., Méndez, F.J., Menéndez, M., Gómez-Pujol, L. i Tintoré, J. 2007. Application of a POT model to estimate the extrem significant wave height levels around the Balearic Sea (Western Mediterranean). *Journal of Coastal Research*, Special Issue, 50: 329-333.
- Costa, M., Cuerda, J. i Rosselló, V.M. 1985. Formentera i els estanys. Panorama geoecològic del Quaternari. *Cuadernos de Geografía*, 37: 75-96.
- Genovés, A., Campins, J. i Jansà, A. 2006. Intense storm in the Mediterranean: a first description from the ERA-40 perspective. *Advances in Geosciences*, 7: 163-168.
- Gómez-Pujol, L., Orfila, A., Álvarez-Ellacuría, A., Tintoré, J. 2011. Controls on sediment Dynamics and medium-term morphological change in a barred microtidal beach (Cala Millor, Mallorca, Western Mediterranean). *Geomorphology*, 132: 87-98.
- Guedes-Soares, C. 2008. Hindcast of dynamic processes of the ocean and coastal areas of Europe. *Coastal Engineering*, 55: 825-836.
- Lionello, P., Bhend, J., Buzzi, A., Della-Marta, P.M., Krichak, S.O., Jansà, A., Maheras, P., Sanna, A., Trigo, I.F. i Trigo, R. 2006. Cyclones in the Mediterranean Region: Climatology and Effects on the Environment. In Lionello, P., Malanotte-Rizzoli, P. i Boscolo, R. (eds). *Mediterranean Climate and Variability*: 325-372. Amsterdam, Elsevier.
- Mendoza, E.T., Jiménez, J.A., Mateo, J. 2011. A coastal storm intensity scale for the Catalan sea (NW Mediterranean). *Natural Hazard Earth System Science*, 11: 2453-2463.
- Morton, R.R. i Sallenger, A.H. 2003. Morphological impacts of extreme storms on sandy beaches and barriers. *Journal of Coastal Research*, 19: 560-573.
- Nott, J. 2006. *Extreme events: a physical reconstruction and assessment*. Cambridge, Cambridge University Press. 297 pp.
- Jiménez, J.A., Sancho-García, A., Bosom, E., Valdemoro, H.I., Guillén, H. 2012. Storm-induced damages along the Catalan coast (NW Mediterranean) during the period 1958-2008. *Geomorphology*, 143-144: 24-33.
- Servera, J. 1999. Principals trets fisiogràfics i climàtics de les Pitiüses. *Territoris*, 2: 9-37.