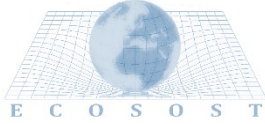


Estudi sobre les tendències de canvi climàtic a les platges metropolitanes



Desembre 2024

REDACCIÓ



COORDINACIÓ



Aleix Coral, *cap d'Infraestructures*

© 2024, Àrea Metropolitana de Barcelona (AMB)

Cap part d'aquesta publicació, incloent-hi el disseny general i la coberta, no pot ser copiada, reproduïda, distribuïda, transformada, emmagatzemada o transmesa de cap manera ni per cap mitjà, tant si és elèctric com químic, mecànic, òptic, de gravació, de fotocòpia o per altres mètodes, sense l'autorització prèvia per escrit dels titulars de la propietat intel·lectual.

ÍNDEX

1. INTRODUCCIÓ.....	5
2. CLIMA MARÍTIM	6
2.1. Fonts de dades.....	6
2.2. Distribució sectorial de l'onatge.....	7
2.3. Règim mitjà de l'onatge.....	9
2.4. Règim extremal de l'onatge.....	10
2.5. Relació H _s -T _p	11
2.6. Tendències del flux energètic mitjà d'onatge	16
2.7. Tendències del nombre de temporals.....	17
2.8. Tendències de l'alçària d'onada.....	24
2.9. Tendències del període de l'onatge	28
2.10. Distribució sectorial del vent.....	33
2.11. Règim mitjà del vent.....	35
2.12. Tendències de la velocitat del vent	36
2.13. Tendències del flux energètic mitjà de vent	42
2.14. Altres consideracions	43
2.15. Nivell mitjà del mar	45
2.15.1. Marea astronòmica i meteorològica	45
2.15.2. Efectes del canvi climàtic en el nivell mitjà.....	49
3. PROPAGACIONS DE L'ONATGE	56
3.1. Característiques numèriques	56
3.2. Propagacions de l'onatge.....	59
4. RESULTATS DE L'ONATGE LOCAL.....	62
4.1. Punt de Badalona. Municipis del nord.....	63
4.1.1. Tendències del flux mitjà	65
4.1.2. Tendències del nombre de temporals	65
4.1.3. Tendències de l'alçària d'onada.....	69
4.2. Punt de Gavà-Castelldefels.....	72
4.2.1. Tendències del flux mitjà	73
4.2.2. Tendències del nombre de temporals	74
4.2.3. Tendències de l'alçària d'onada.....	78
4.3. Punt del Prat-Viladecans	81
4.3.1. Tendències del flux mitjà	83
4.3.2. Tendències del nombre de temporals	84
4.3.3. Tendències de l'alçària d'onada.....	88

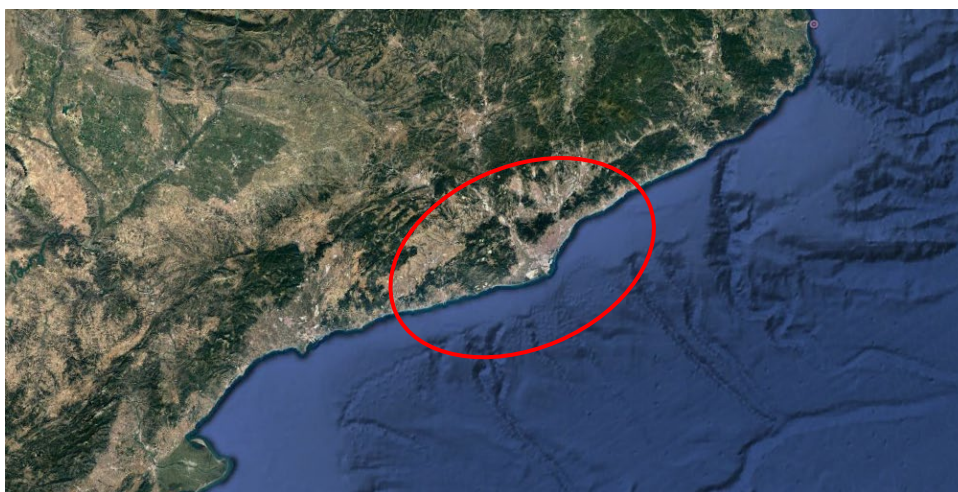
Annex 1. Llista dels clústers emprats en propagació

Annex 2. Figures de propagació

1. INTRODUCCIÓ

Es planteja l'estudi de tendències de clima marítim a la costa de l'àrea metropolitana de Barcelona. A la figura 1 es pot veure la ubicació de la costa catalana de Barcelona.

Figura 1. Costa catalana de l'àrea metropolitana de Barcelona



Font: elaboració pròpia.

Amb l'objectiu d'estudiar l'evolució futura de les diferents variables, es planteja el càlcul de l'efecte del canvi climàtic mitjançant la revisió de la bibliografia específica per al nivell mitjà del mar i l'anàlisi de les tendències per a la resta de variables més representatives: alçària d'onada, període de l'onatge, flux mitjà de l'onatge, nombre de temporals, velocitat del vent i flux mitjà del vent.

En primer lloc, es fa la caracterització del clima marítim d'onatge a la boia de Barcelona II, del nivell del mar amb el mareògraf de Barcelona i del vent amb un node SIMAR davant de la costa, amb l'anàlisi de cadascuna de les variables. Seguidament, es calcula el règim extremal d'onatge, una selecció de determinats casos representatius de l'onatge a la ubicació de la boia i la propagació fins a la costa en els punts escollits.

La selecció dels casos representatius es fa per mitjà de l'aplicació d'un algoritme de màxima dissimilitud (MaxDiss o MDA) i la propagació d'aquests casos es duu a terme mitjançant l'ús del model numèric SWAN (*simulating waves nearshore*), forçat amb les dades d'onatge, vent i mareas, que permeten obtenir les característiques de l'onatge als punts de les platges on es volen conèixer els valors locals d'onatge i es vol analitzar la dinàmica litoral.

Finalment, es fa una altra anàlisi de règim climàtic en els punts a prop de la costa per obtenir els onatges de més impacte i les tendències generals de cadascuna de les variables analitzades.

2. CLIMA MARÍTIM

La caracterització del clima marítim es duu a terme a partir de les dades proporcionades per Ports de l'Estat, amb les quals s'obtenen els valors de règim mitjà i de règim extremal característics de la zona d'estudi en la qual es treballa.

En aquest apartat s'analitza la influència del canvi climàtic en les diferents variables que es veuen afectades per aquest fenomen.

D'una banda, es calculen les tendències de les principals variables, com ara l'alçària d'onada, el període de l'onatge, el flux mitjà de l'onatge, el nombre de temporals i la velocitat i el flux del vent.

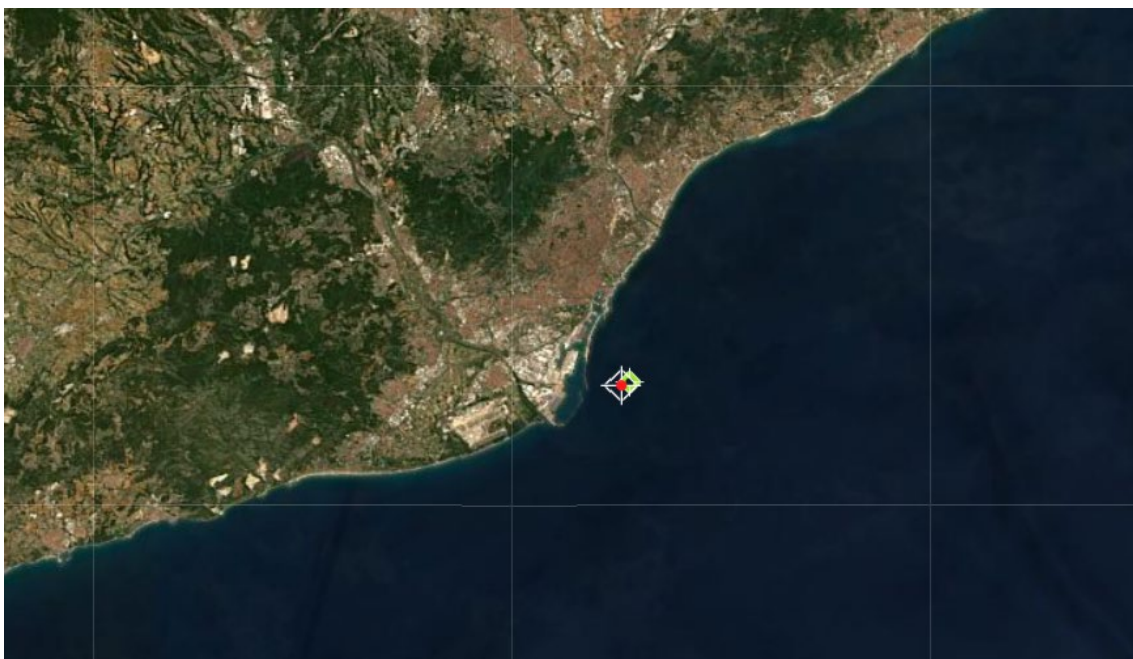
De l'altra, es considera una anàlisi del nivell mitjà del mar de manera global i en detall a la zona d'estudi. S'estudien les projeccions de l'IPCC i d'altres organismes internacionals.

2.1. Fonts de dades

Per tal de fer l'anàlisi del règim d'onatge en les proximitats de les platges estudiades, s'han utilitzat les dades instrumentals de Ports de l'Estat, en concret, de la boia de Barcelona.

La boia de Barcelona, que pertany a la xarxa exterior de boies de Ports de l'Estat REDEXT, se situa a les coordenades geogràfiques 2.21° E i 41.32° N, a l'est de la zona d'estudi (vegeu la figura 2), a una fondària de 68 m i representa una sèrie amb periodicitat horària, i un registre que va des del 1958 fins avui.

Figura 2. Ubicació de les dades de la boia de Barcelona II i del node SIMAR



Font: Ports de l'Estat.

La informació proporcionada per la boia fa referència a dades d'onatge.

Les dades de vent s'han obtingut d'un node SIMAR ubicat davant la costa, a les coordenades geogràfiques 2.21° E i 41.32° N (vegeu la figura 2), que representa una sèrie amb periodicitat horària i un registre que va des de març del 1958 fins avui.

Pel que fa a les dades de mareas, s'han usat les dades del mareògraf de Barcelona 2, que està ubicat al moll 140 de la planta d'ENAGAS, coordenades geogràfiques 2.17° E i 41.34° N (vegeu la figura 3).

Les dades del mareògraf ofereixen, cada 10 minuts, valors dels components de la marea astronòmica i la marea meteorològica, així com del nivell mitjà del mar, com a resultat de la suma de tots dos components. El registre abasta des d'inicis del 1993 fins a l'actualitat.

Figura 3. Ubicació del mareògraf



Font: Ports de l'Estat.

2.2. Distribució sectorial de l'onatge

La distribució sectorial de l'onatge es representa amb les roses d'onatge, que discretitzen les dades en direccions i alçàries d'onada. Cada sector es representa amb un braç de la rosa. La longitud de cada braç és proporcional a la probabilitat de presentació de cada sector, calculada com la freqüència relativa mostral. D'aquesta manera, es poden apreciar visualment quins són els sectors que predominen. La discretització en alçàries d'onada permet determinar quins són els sectors més energètics.

A la figura 4 es mostra la rosa d'onatge de la boia de Barcelona, en la qual s'aprecia que els onatges es concentren entre les direccions ENE i SSWE; el sector més freqüent és l'E, i els més energètics són l'E i, a continuació, l'ESE.

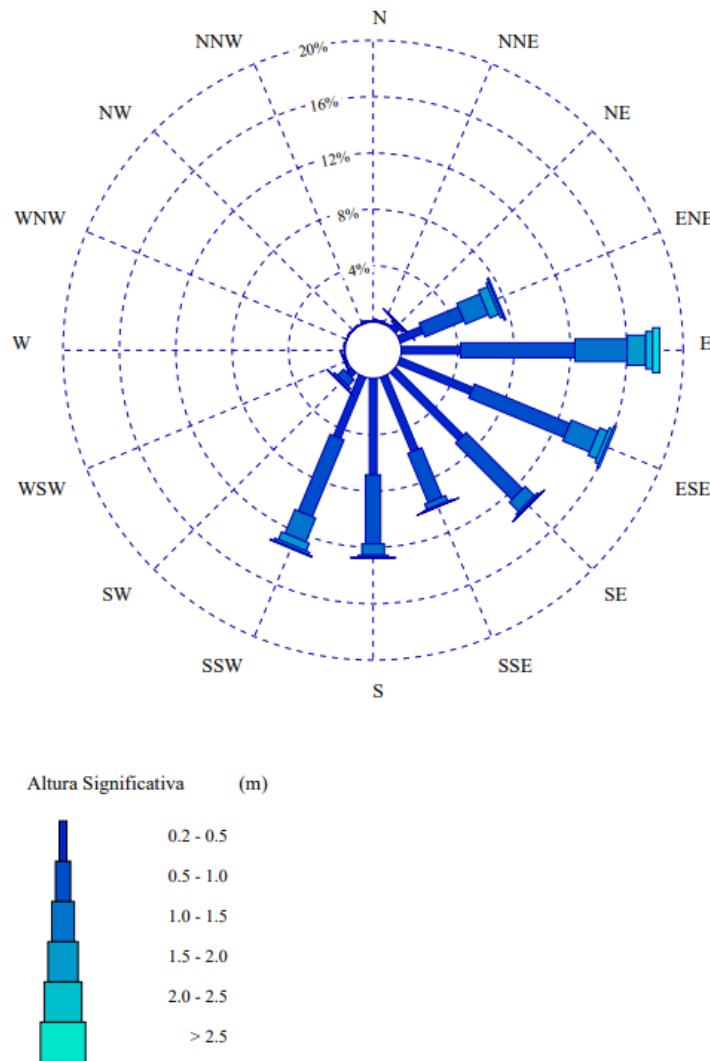
A la taula 1 es mostren les relacions entre les dades d'alçària d'onada i les direccions d'onatge a la boia. Es pot observar que els onatges més extrems són els de llevant (l'ESE i l'E, seguits

per l'ENE), mentre que, dels temporals del S, el sector que destaca és el SSW, amb valors, però, notablement inferiors als de llevant.

Aquest fet és característic de les zones de la Mediterrània central, amb grans temporals de llevant, especialment durant l'hivern, i alguns temporals de garbí, que se solen presentar des de finals d'estiu fins ben entrada la primavera.

Atenent aquestes dades i l'orientació de la costa a la zona d'estudi, els onatges que tenen més incidència en les propagacions des de la font de dades fins a les platges són els compresos entre el NE i l'WSW. La resta de sectors no tenen gaire importància a l'hora de determinar les condicions mitjanes i extremes, tot i que a l'hora de fer la propagació s'han de considerar tots els onatges.

Figura 4. Rosa d'onatge de la boia de Barcelona



Font: Ports de l'Estat.

Taula 1. Taula de dades d'H_s (m) en relació a les diferents direccions de la boia de Barcelona

Sector/Hs	<=0.5	0.5-1.0	1.0-1.5	1.5-2.0	2.0-2.5	2.5-3.0	3.0-3.5	3.5-4.0	3.0-4.5	>=4.5	%	TOTAL
N	50	7	1	0	0	0	0	0	0	0	0.04	58
NNE	136	9	2	0	0	0	0	0	0	0	0.09	147
NE	581	280	84	11	5	4	0	0	0	0	0.61	965
ENE	2663	4788	2945	1126	356	136	51	10	0	0	7.65	12075
E	6329	13062	6306	2235	845	396	223	97	46	15	18.72	29554
ESE	8564	12742	3676	1042	423	162	54	6	3	3	16.9	26675
SE	11209	10372	1694	297	77	9	3	0	0	0	14.99	23661
SSE	9893	6822	813	142	37	7	0	0	0	0	11.22	17714
S	11191	9182	1385	257	95	36	7	3	0	0	14.03	22156
SSW	7105	10121	3245	1036	328	106	29	5	1	0	13.92	21976
SW	786	1184	358	70	18	4	0	0	0	0	1.53	2420
WSW	104	133	17	0	0	0	0	0	0	0	0.16	254
W	52	54	2	0	0	0	0	0	0	0	0.07	108
WNW	31	23	0	0	0	0	0	0	0	0	0.03	54
NW	29	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0.02	33
NNW	30	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0.02	33
%	37.21	43.57	13	3.94	1.38	0.54	0.23	0.08	0.03	0.01	100	
TOTAL	58753	68786	20528	6216	2184	860	367	121	50	18		157883

Font: elaboració pròpia.

2.3. Règim mitjà de l'onatge

L'objectiu de l'estudi de règim mitjà és caracteritzar la probabilitat de no superar diferents llinars d'alçàries d'onada en un any mitjà, i això es fa ajustant la mostra d'alçàries d'onada disponible a una funció de distribució acumulada. La funció que s'empra habitualment per caracteritzar el règim mitjà d'onatge és la distribució Weibull de mínims.

La funció de distribució acumulada de la funció de Weibull és:

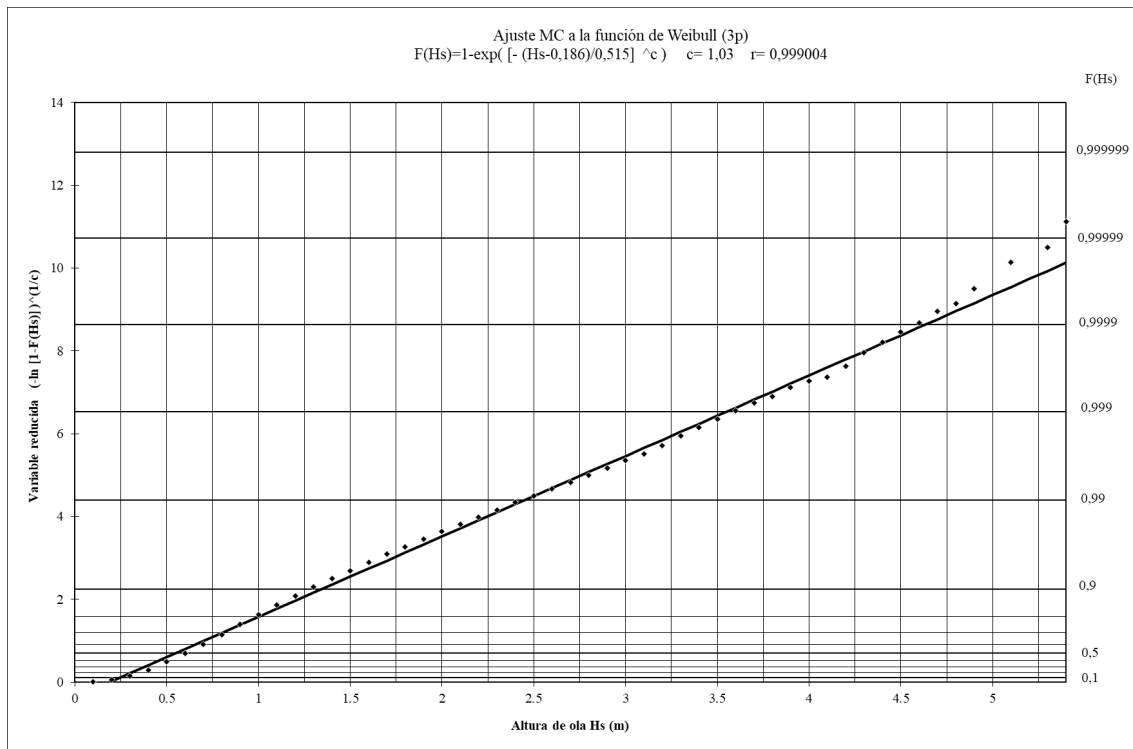
$$P[H_s \leq h] = 1 - \exp\left[-\left(\frac{h - A}{B}\right)^C\right]$$

On A és el paràmetre de posició, B és el paràmetre d'escala i C és el paràmetre de forma. Els tres paràmetres d'aquesta distribució s'han calculat amb el mètode dels moments.

Per determinar el règim mitjà escalar de la boia, s'ha ajustat la mostra proposada per a totes les dades del node a una distribució de Weibull de mínims. A la figura 5 es pot veure l'ajust. El valor estimat dels paràmetres de la distribució ha estat: A = 0,186, B = 0,515 i C = 1,03.

Aquestes distribucions es poden utilitzar únicament per a condicions mitjanes; per tenir un ordre de magnitud, la probabilitat que l'alçària d'onada no sigui superada més de 12 hores per any és de 0,9986, la de 48 hores és de 0,9945 i la d'una setmana és de 0,9808. Per tant, aquestes distribucions s'han de fer servir per a valors de probabilitat d'excedència situats a la part central de l'ajust, en què els valors d'alçària d'onada voregen els 2,5 m.

Figura 5. Règim mitjà escalar de la boia de Barcelona II



Font: elaboració pròpia.

2.4. Règim extremal de l'onatge

La caracterització dels valors extrems és molt important des del punt de vista de l'enginyeria, perquè està relacionada amb la definició de les accions externes que han de resistir les estructures que es dissenyen.

El problema a l'hora de caracteritzar aquestes accions és que els successos perillosos tenen lloc amb relativa poca freqüència. Per tant, s'ha d'utilitzar una teoria que permeti estimar el comportament dels nivells alts a partir de nivells més baixos. Això s'aconsegueix amb la teoria de valors extrems.

En funció de les dades que s'empren per extrapolar el comportament de la cua superior de la distribució, es distingeixen els mètodes següents: distribució de mitjanes, en què s'utilitzen totes les dades disponibles i s'extrapola el resultat a la cua superior; distribució d'extrems, en què es divideix el temps de registre en intervals i només es fa servir el màxim de cadascun, i distribució d'excessos, en què es calcula la distribució dels excessos sobre un llindar.

Segons el teorema de Fisher-Tippett, si la distribució que es vol caracteritzar té la cua superior regular i el nombre de dades és prou gran, la distribució del seu màxim s'aproxima a un dels models següents: Fréchet, Gumbel o Weibull.

En aquest cas, l'anàlisi extremal dels sectors més energètics s'ha fet a partir de l'obtenció d'una mostra d'extrems representativa, seleccionant els temporals pel mètode del llindar o POT (*peak over threshold*) i ajustant els valors de la mostra a una funció de distribució de Weibull, pel mètode d'ajust de mínims quadrats (MC).

La selecció de temporals independents entre si que defineixen el règim extremal direccional s'ha determinat a partir d'un llindar d'alçària d'onada diferent per a cada un dels sectors anteriors, en funció de la capacitat energètica del sector i dels successos registrats.

A partir d'aquest llindar, s'obté per a cada sector una mostra d'extrems que permet definir el paràmetre Lambda (λ), que relaciona el nombre de tempestes a l'any i que intervé en l'ajust extremal. Tots aquests valors es resumeixen a la taula 2.

Taula 2. Paràmetres de l'ajust extremal pel mètode POT

Sector	H_s POT	Nre. temp.	Lambda
ENE	2,0	98	4,833
E	2,2	99	4,882
ESE	1,8	117	5,770
SE	1,5	94	4,636
SSE	1,3	111	5,346
S	1,5	97	4,784
SSW	1,8	95	4,685
SW	1,1	112	5,524

Font: elaboració pròpia.

Els resultats d'aquests ajustos es mostren a les figures 6-13.

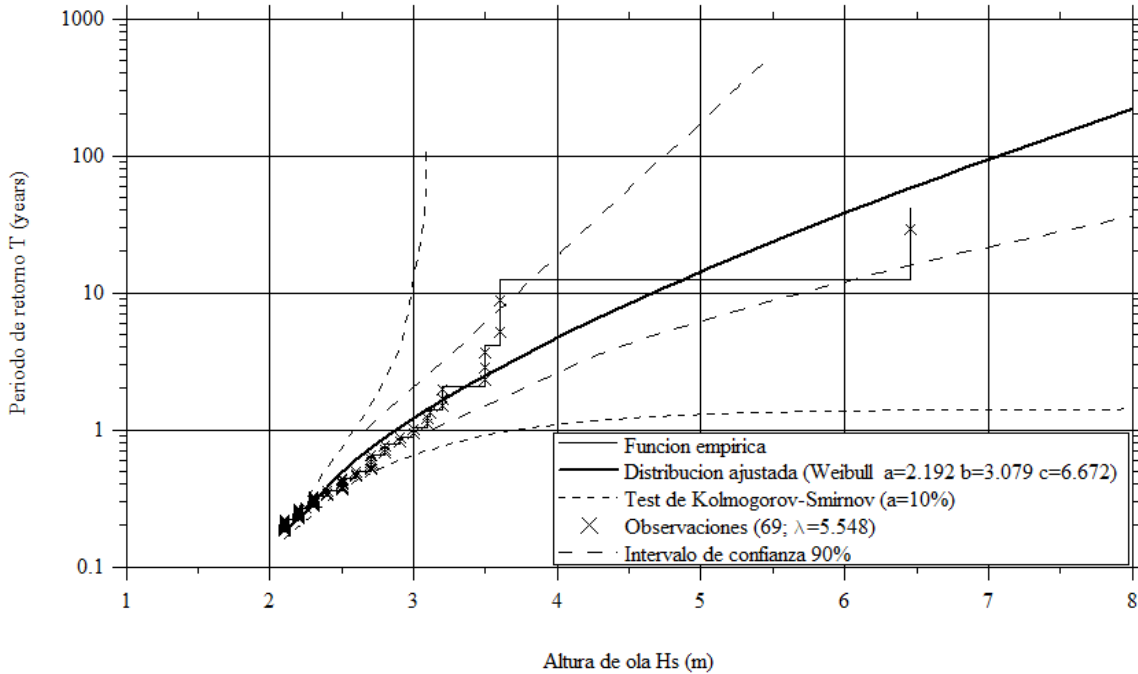
2.5. Relació H_s - T_p

A continuació, s'estableix la caracterització dels períodes de l'onatge amb l'alçària d'onada, que s'obté mitjançant la relació entre ambdues variables a partir de les dades de la boia.

A la figura 14 es mostra el diagrama de dispersió de les dades registrades, on se superposen les corbes d'isoperalt mitjà en aigües fondes (S_{0p}), definit com a $S_{0p} = H_{s0} \cdot 2\pi / (g \cdot T_p^2)$.

Figura 6. Règim extremal direccional. Sector ENE

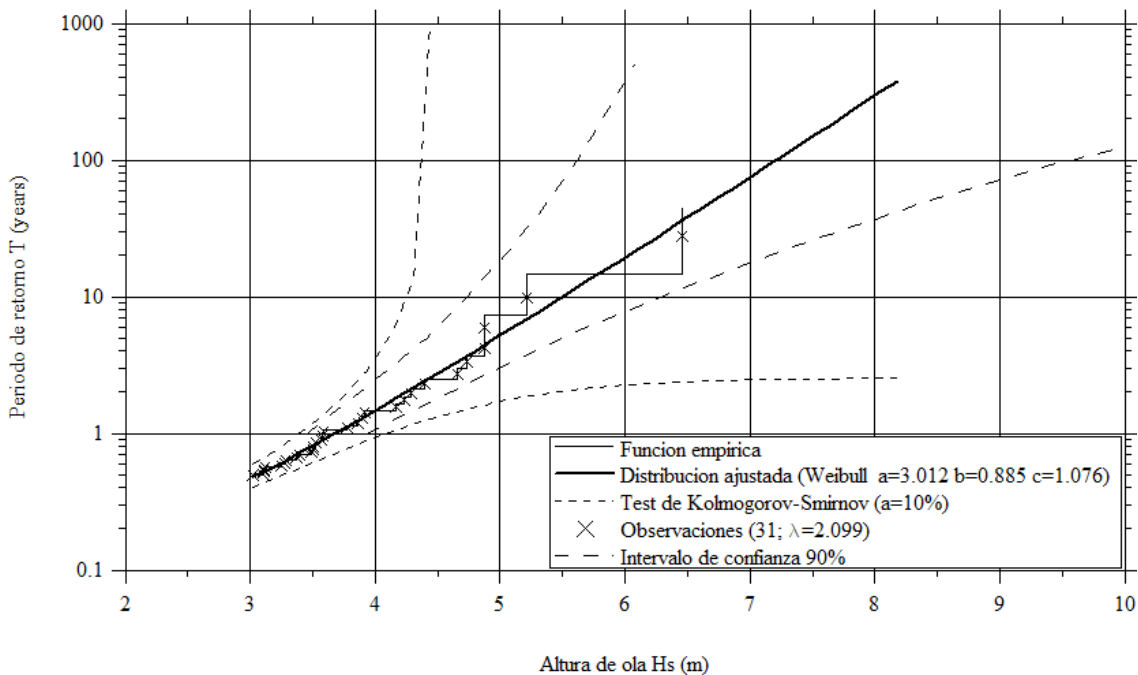
**Regimen extremal direccional. Seleccion metodo POT Hs > 2.0 m
 Ajuste MC a la distribucion Weibull. Sector ENE**



Font: elaboració pròpia.

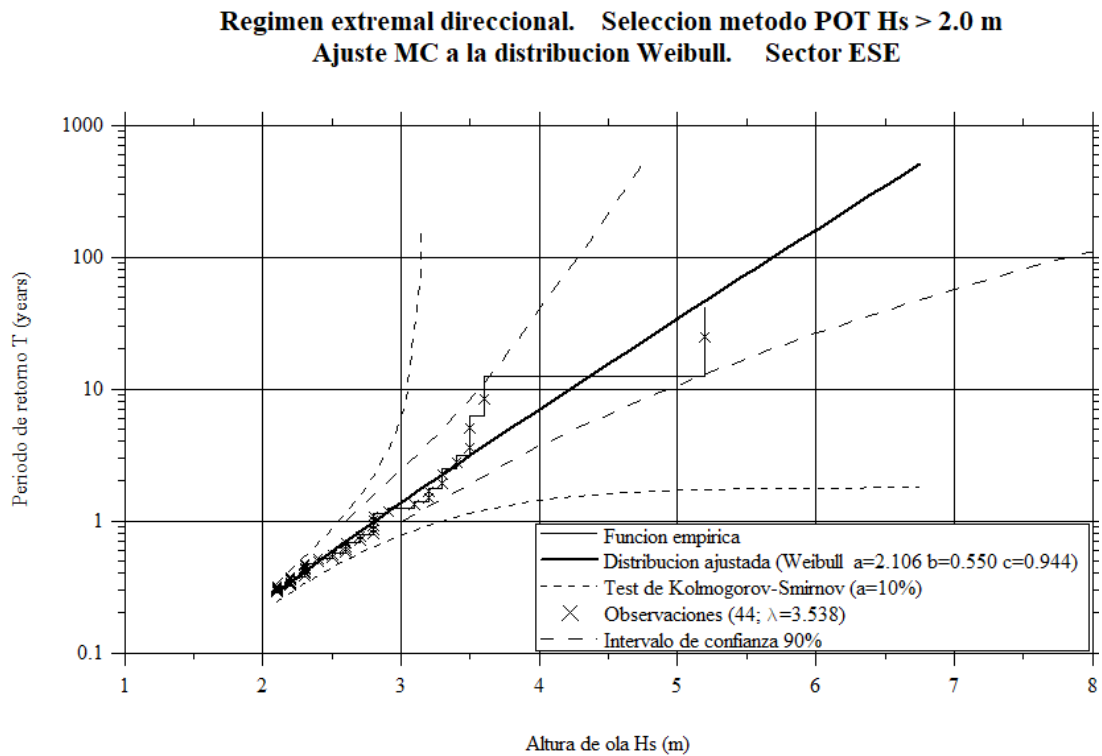
Figura 7. Règim extremal direccional. Sector E

**Regimen extremal direccional. Seleccion metodo POT Hs > 3.0 m
 Ajuste MC a la distribucion Weibull. Sector E**



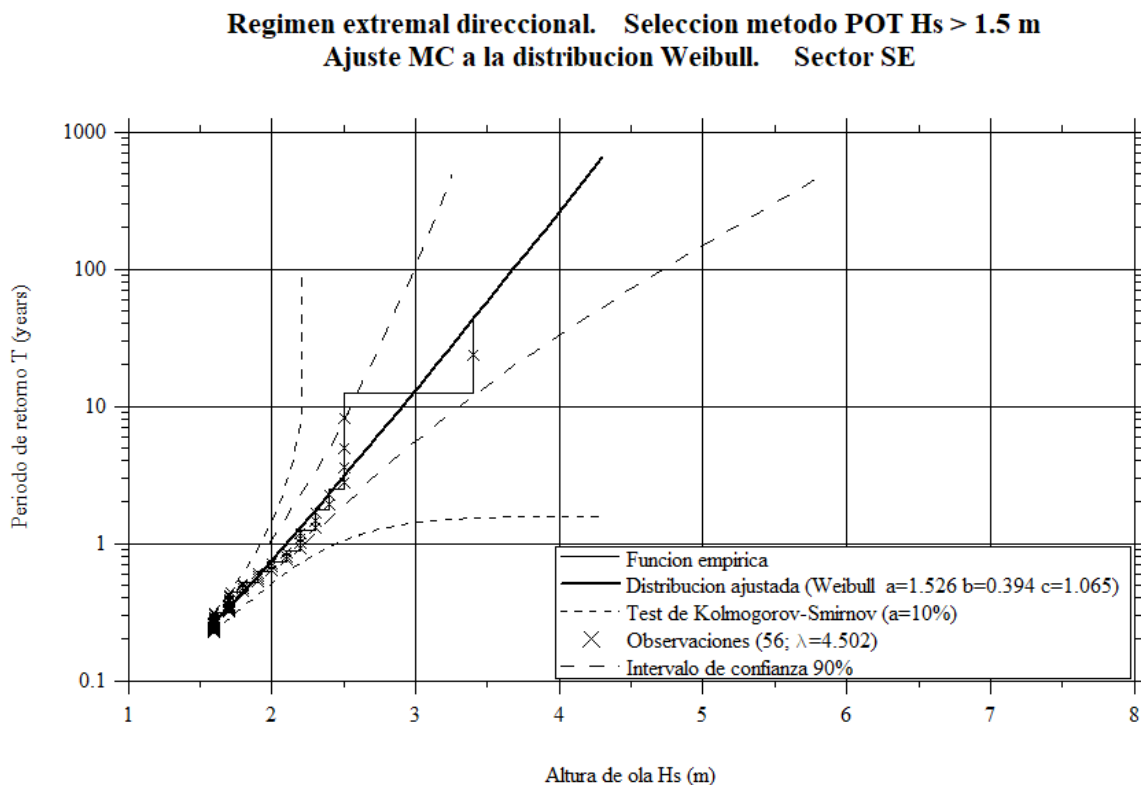
Font: elaboració pròpia.

Figura 8. Règim extremal direccional. Sector ESE



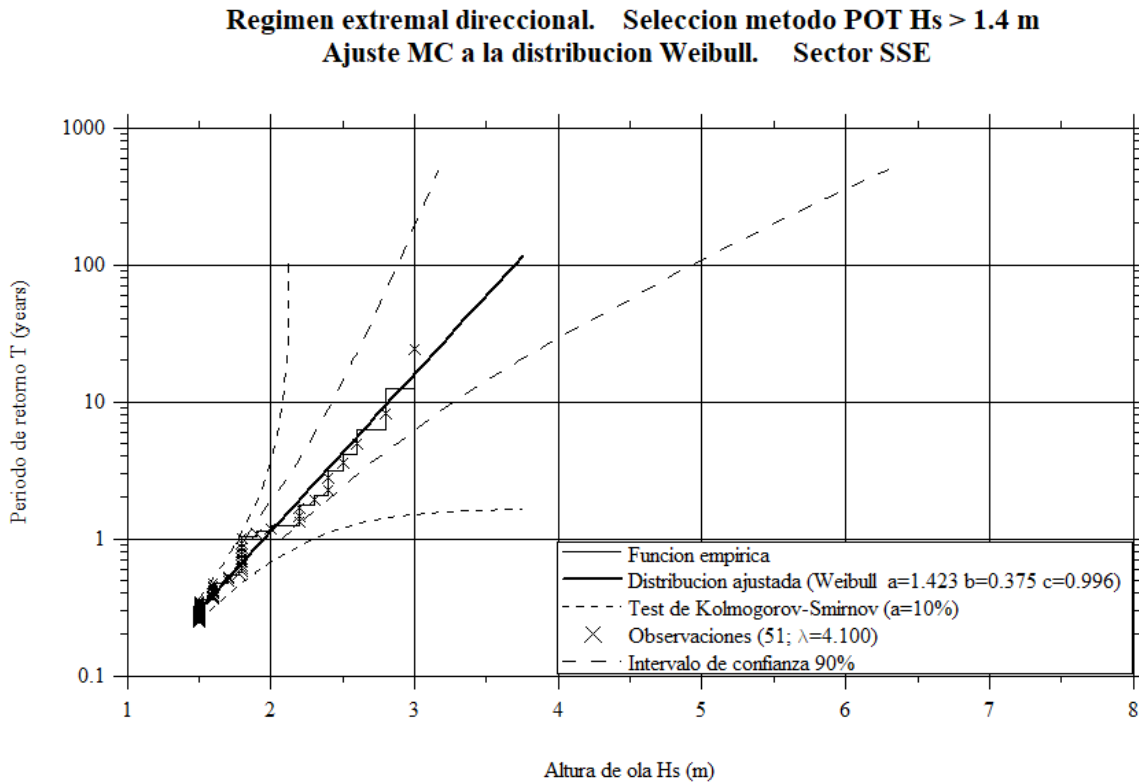
Font: elaboració pròpia.

Figura 9. Règim extremal direccional. Sector SE



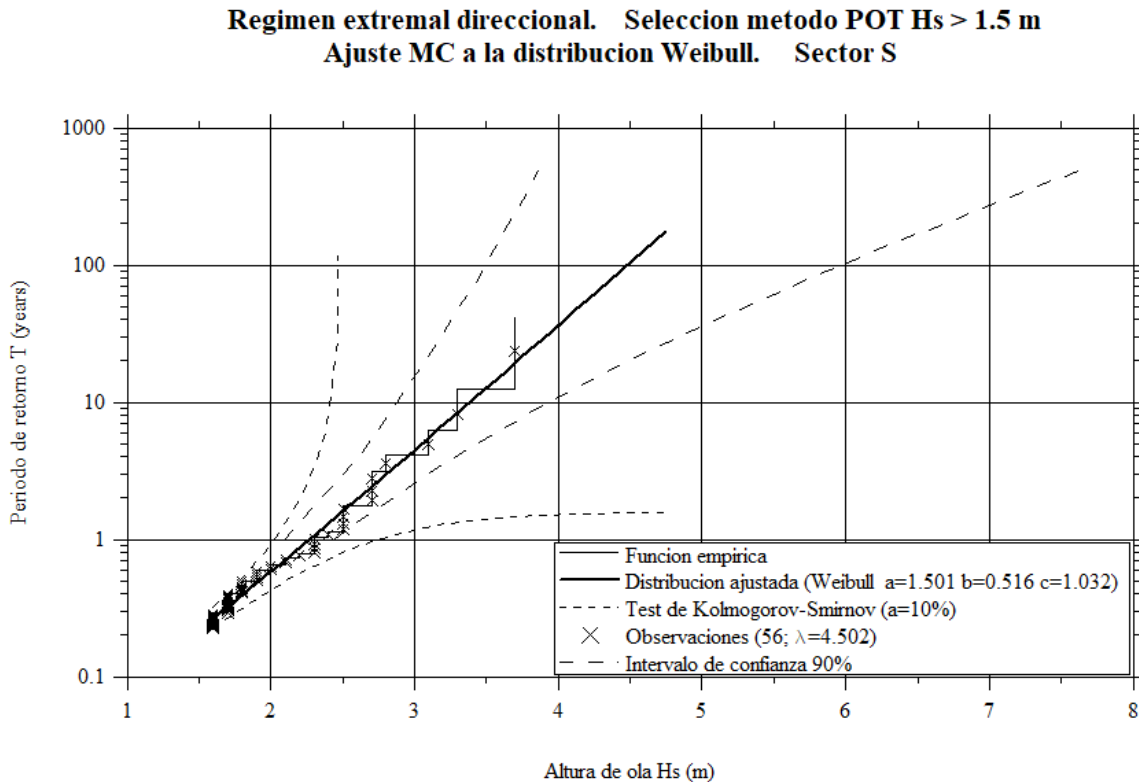
Font: elaboració pròpia.

Figura 10. Règim extremal direccional. Sector SSE



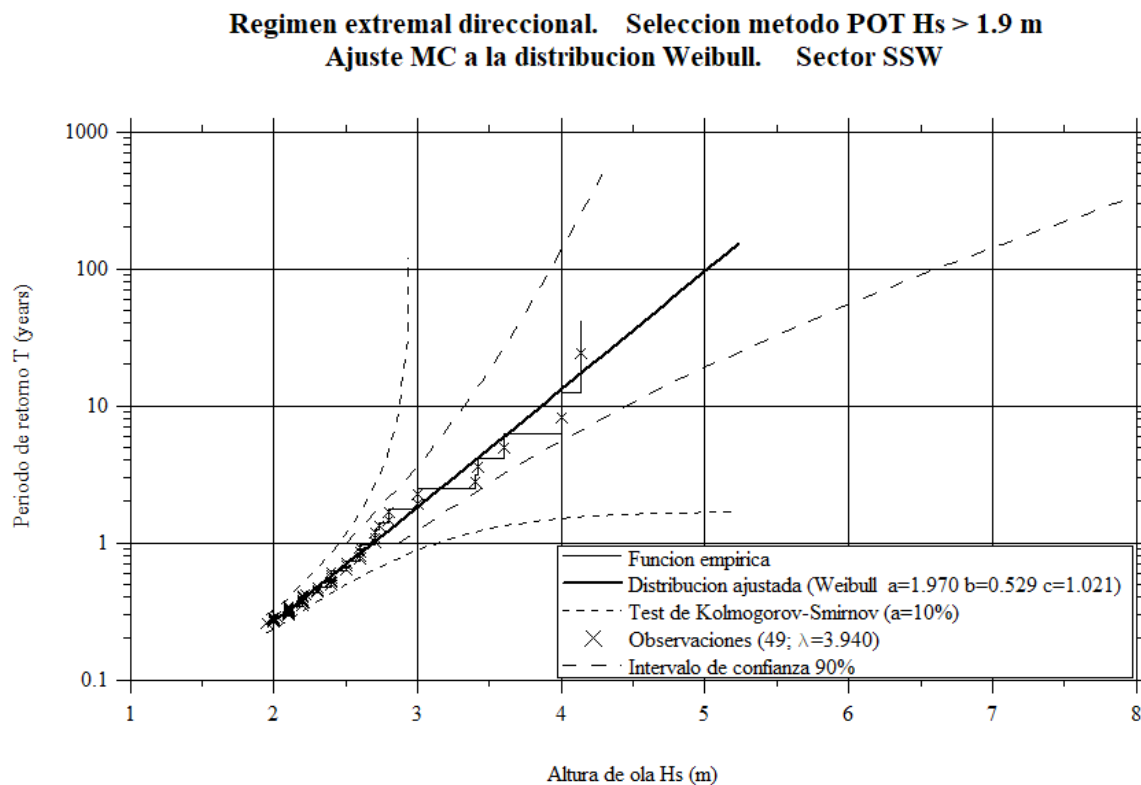
Font: elaboració pròpia.

Figura 11. Règim extremal direccional. Sector S



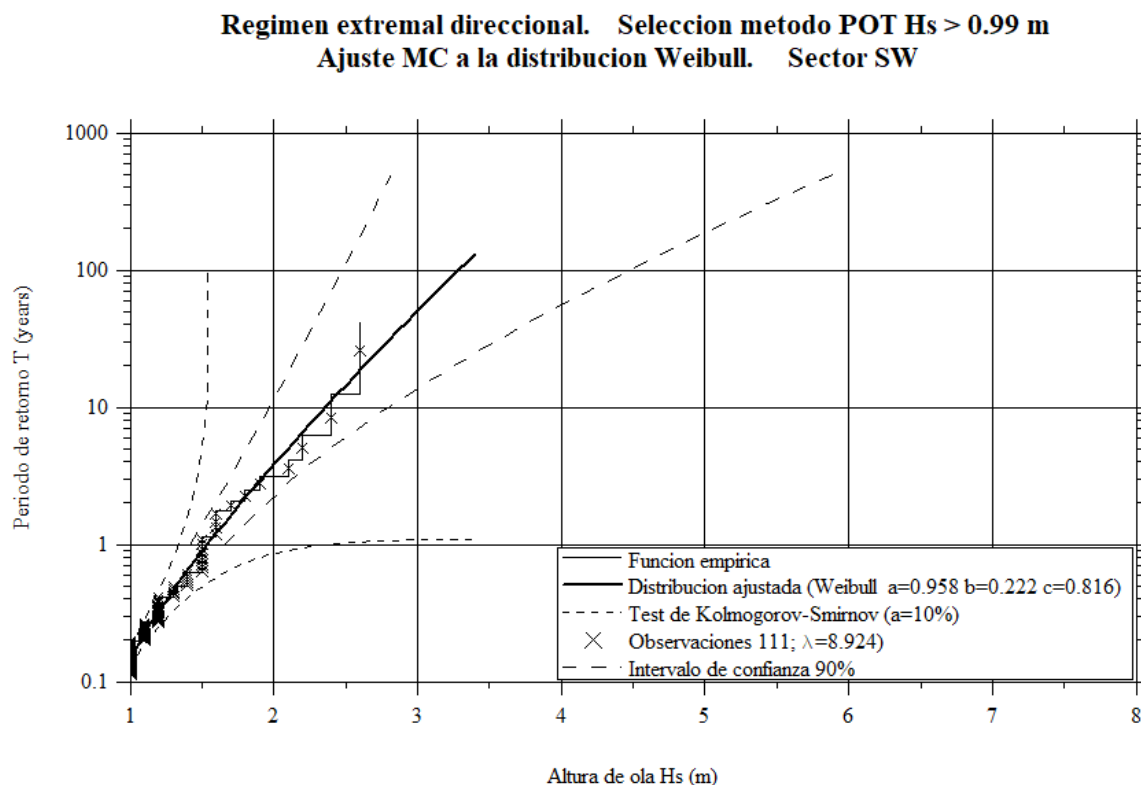
Font: elaboració pròpia.

Figura 12. Règim extremal direccional. Sector SSW



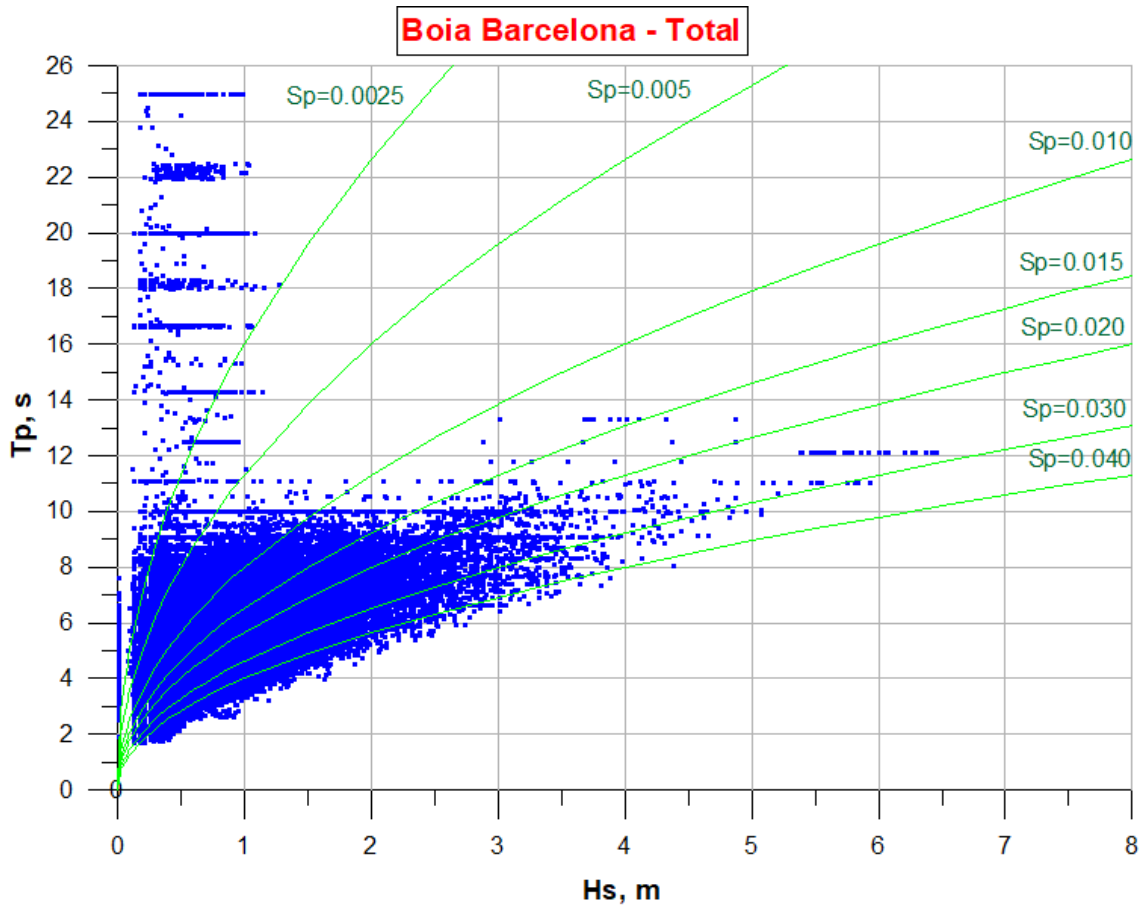
Font: elaboració pròpia.

Figura 13. Règim extremal direccional. Sector SW



Font: elaboració pròpia.

Figura 14. Diagrama de dispersió H_s-T_p



Font: elaboració pròpia.

La pràctica totalitat de les dades es troba entre els valors de $S_{op} = 0,0025$ i $S_{op} = 0,050$, tot i que elevats valors d'alçària d'onada significant (que equival als temporals) tenen associats peralts més alts, de $S_{op} = 0,020$ a $S_{op} = 0,030$.

A partir d'aquestes gràfiques, dels resultats de l'ajust extremal de l'onatge i de l'estudi dels nivells de marea, es poden definir els diferents onatges extrems a la ubicació de la boia, que són propagats amb model numèric fins a peu de dic i defineixen les condicions locals per dur a terme l'estudi de l'ultrapassament.

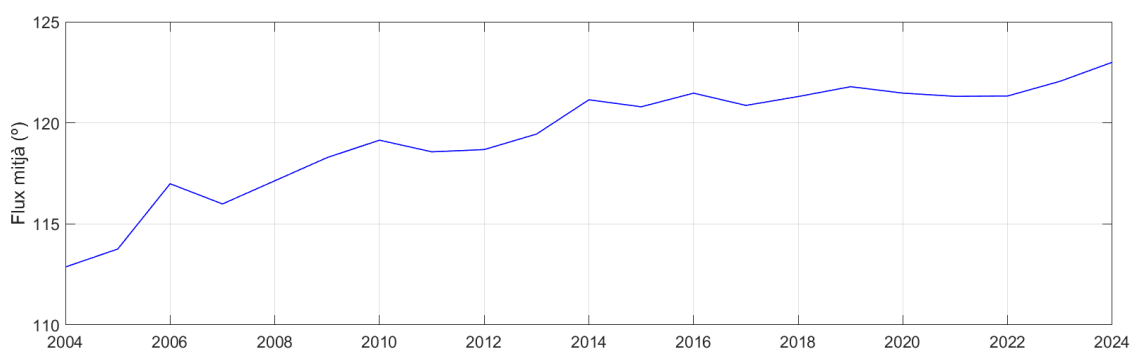
2.6. Tendències del flux energètic mitjà d'onatge

Per fer l'anàlisi de l'evolució de les condicions mitjanes, cal ressaltar el flux mitjà que rep la costa. La determinació del flux energètic mitjà es pot obtenir a partir del conjunt global de dades d'onatge: estandarditzant la direcció amb el factor energètic $H_s^2 \cdot T_p$ i component la sèrie completa de flux mitjà, és a dir, cada direcció de la sèrie, amb una periodicitat horària, es multiplica per aquest factor i es fa la suma de totes les variables obtingudes fins al final de la sèrie. A continuació, aquesta suma es divideix per la suma dels factors energètics horaris.

A la figura 15 es mostra l'evolució del flux energètic mitjà al llarg dels anys. L'any 2004 no és representatiu, perquè només conté dades d'aquell any, però, a mesura que avancem, es van acumulant les dades de flux mitjà i la línia tendeix a estabilitzar-se. Cal destacar que no hi ha dades des del mes de novembre de l'any 2007 fins al mes de juny de l'any 2009, perquè la boia va deixar de mesurar per diverses raons. A la gràfica s'han unit els anys 2007 i 2009, encara que entremig no hi hagi dades.

També cal destacar que les dades de l'any 2009 només abasten des del mes de juny; per tant, no és un any gaire representatiu, però n'hi ha prou per continuar amb els càlculs del flux mitjà. De la mateixa manera, l'any 2024 no té dades horàries més enllà del mes de novembre.

Figura 15. Evolució del flux energètic mitjà acumulat



Font: elaboració pròpia.

A la gràfica es poden observar les fluctuacions pròpies dels primers anys per la falta de dades acumulades. Des de l'any 2009 fins al 2013, es pot veure clarament la tendència d'un flux mitjà que augmenta des dels 115° fins al voltant dels 120°. Aquestes variacions podrien respondre a la manca de dades acumulades, perquè són representatives d'una sèrie de curta durada.

A partir de l'any 2014 en endavant, amb una sèrie ja consolidada, s'observa una estabilització entorn dels 121-122°. Aquesta tendència continua al llarg dels anys següents, tot i que en els darrers anys s'aprecia que el flux mitjà continua virant cap al sud. De fet, es pot afirmar que hi ha hagut un gir cap al sud del flux energètic mitjà d'uns 3° en els últims quinze anys. Això vol dir que l'energia, de mitjana, s'està desplaçant des de les direccions de llevant cap al sud.

2.7. Tendències del nombre de temporals

La distribució sectorial de l'onatge permet calcular els temporals en cada sector que s'hagi seleccionat prèviament. En aquest cas, l'anàlisi extremal dels sectors més energètics s'ha fet a partir de l'obtenció d'una mostra d'extremes representativa, seleccionant els temporals pel mètode del lliandar o POT.

Atenent la capacitat energètica dels diferents onatges, s'analitzen, d'una banda, els que presenten temporals de llevant (els més energètics) i, de l'altra, els temporals del sud. Això significa que l'anàlisi comprèn la zona del sector ENE al sector SW.

Per estimar les tendències dels nombres de temporals per sector cal considerar, en primer lloc, el nombre de buits que té la boia al llarg dels anys. A la taula 3 es recullen els diferents anys amb el percentatge de buits de cada any.

Taula 3. Taula de buits per any

Anys	Buits
2004	0,034
2005	0,054
2006	0,089
2007	1,000
2008	0,254
2009	0,790
2010	0,008
2011	0,069
2012	0,018
2013	0,040
2014	0,009
2015	0,000
2016	0,001
2017	0,093
2018	0,140
2019	0,011
2020	0,049
2021	0,004
2022	0,001

2023	0,006
2024	0,010

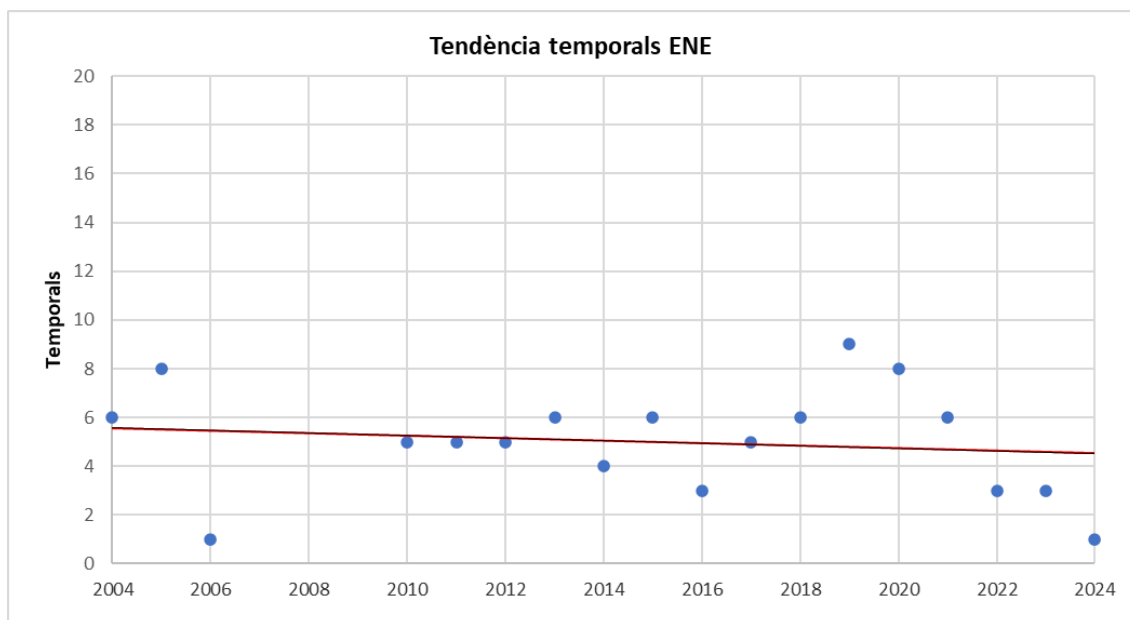
Font: elaboració pròpia.

En color vermell es marquen els anys que tenen un percentatge de buits massa alt per calcular-ne les tendències; per tant, aquests anys no s'utilitzaran. Per mitjà dels altres divuit anys es poden analitzar les tendències de cada sector. Els resultats d'aquestes tendències es mostren a les figures 16-23.

Es pot observar que, per als sectors de llevant, de l'ENE al SSE, les tendències són lleugerament decreixents, és a dir, el nombre de temporals per any al llarg dels divuit anys que s'han considerat ha disminuït. Tanmateix, als sectors amb component sud, entre el S i el SW, hi ha unes tendències creixents que impliquen un augment important en el nombre de temporals al llarg dels anys, sobretot si es considera un període llarg de temps cap al futur.

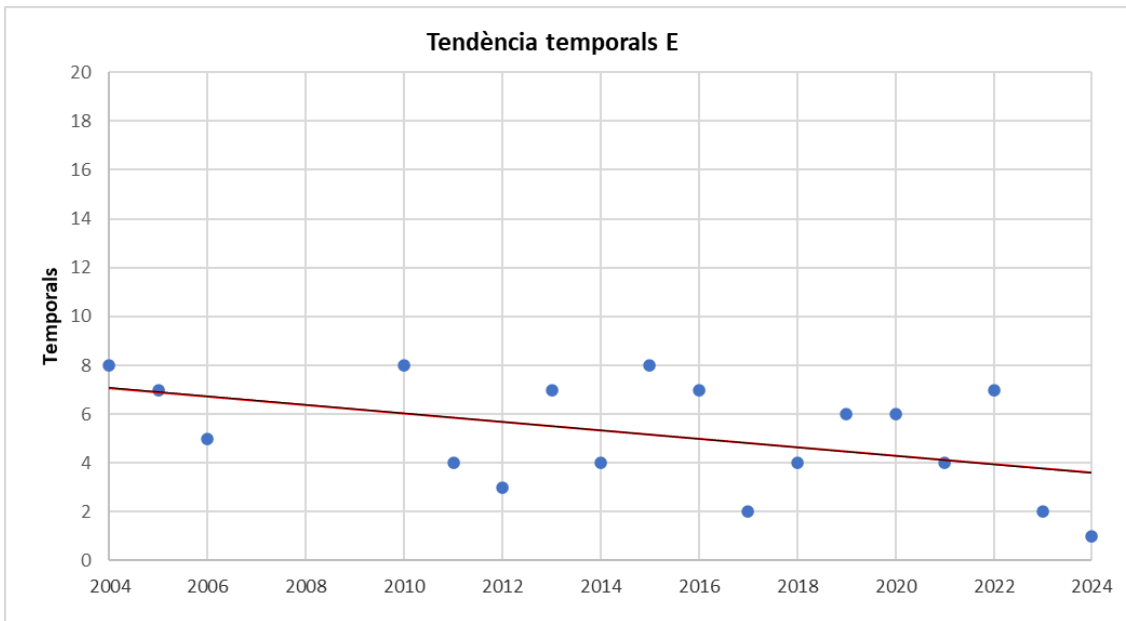
A la taula 4 es mostren les ràtios d'aquestes tendències en increment de temporals per any i sector.

Figura 16. Tendència del nombre de temporals del sector ENE



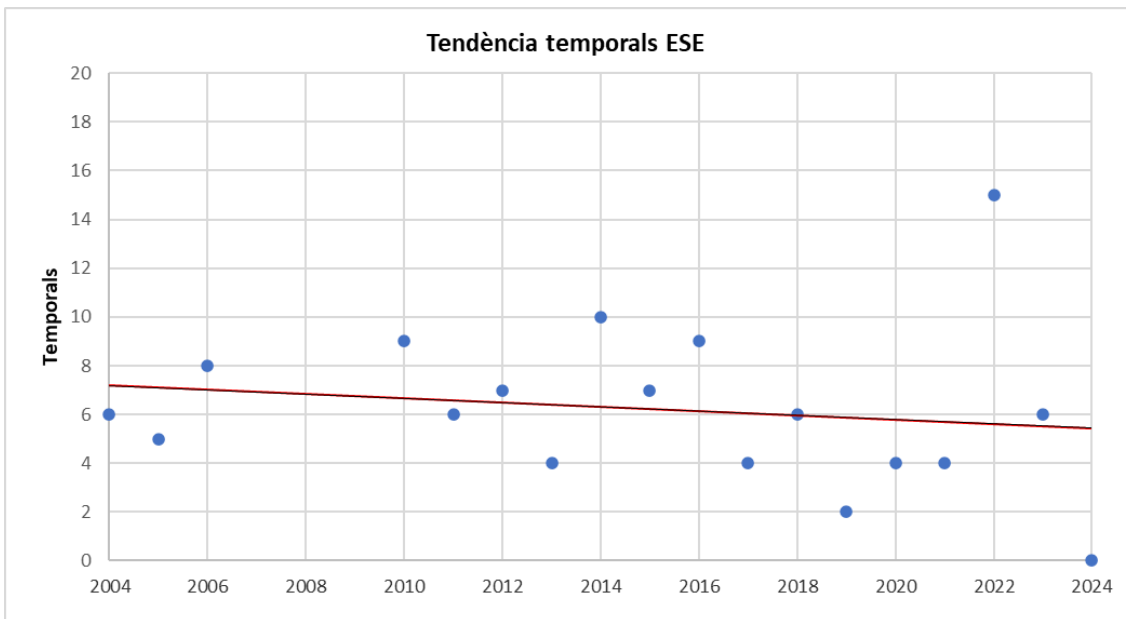
Font: elaboració pròpia.

Figura 17. Tendència del nombre de temporals del sector E



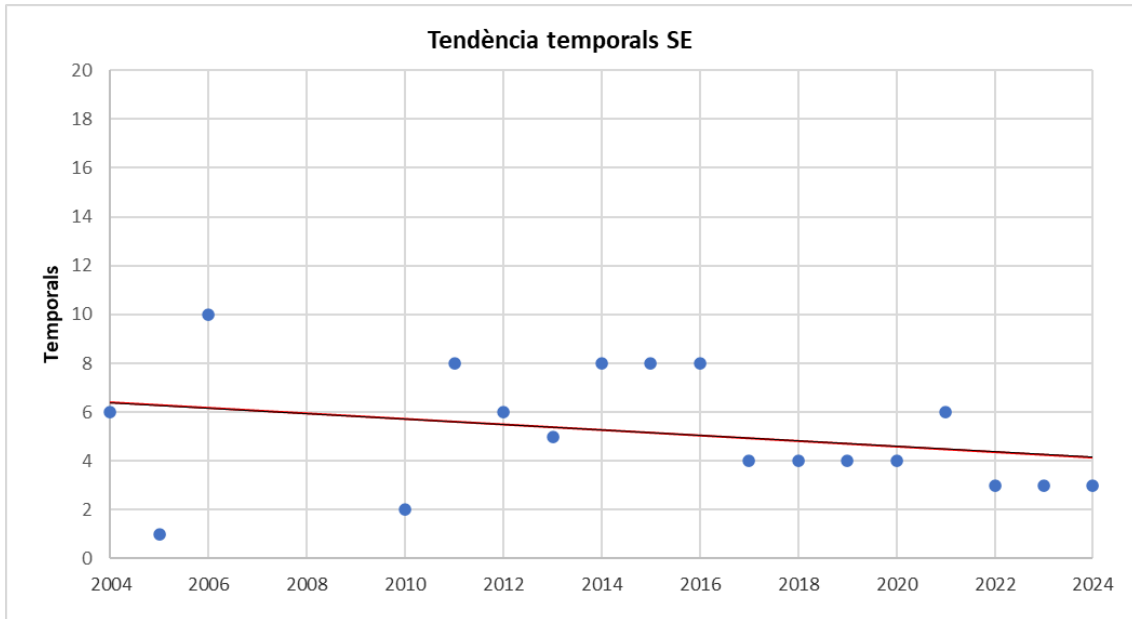
Font: elaboració pròpia.

Figura 18. Tendència del nombre de temporals del sector ESE



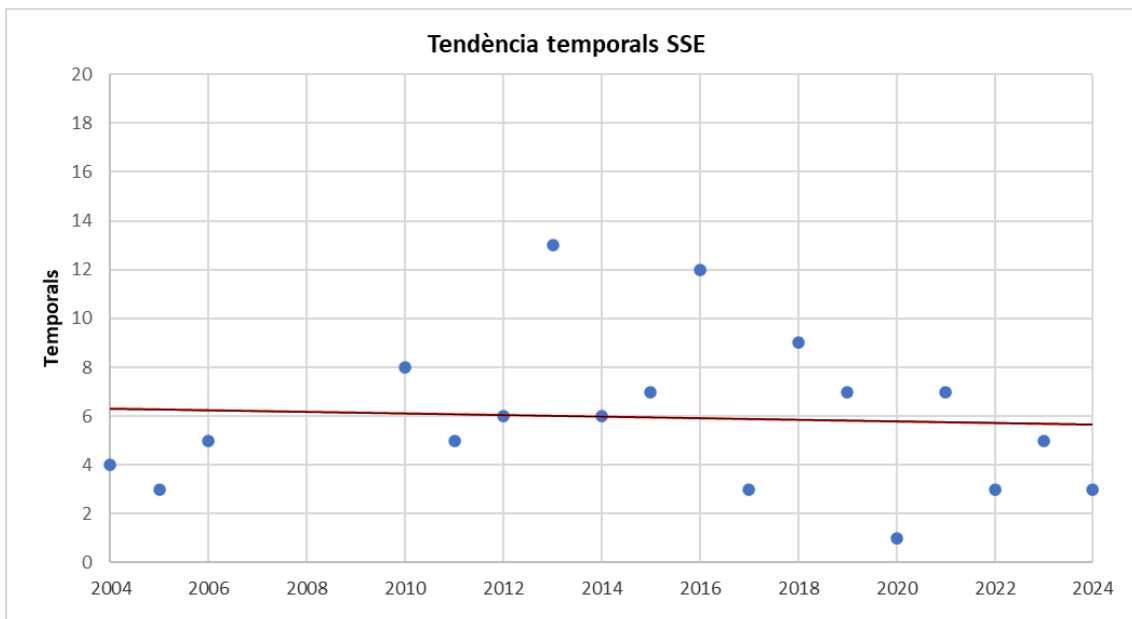
Font: elaboració pròpia.

Figura 19. Tendència del nombre de temporals del sector SE



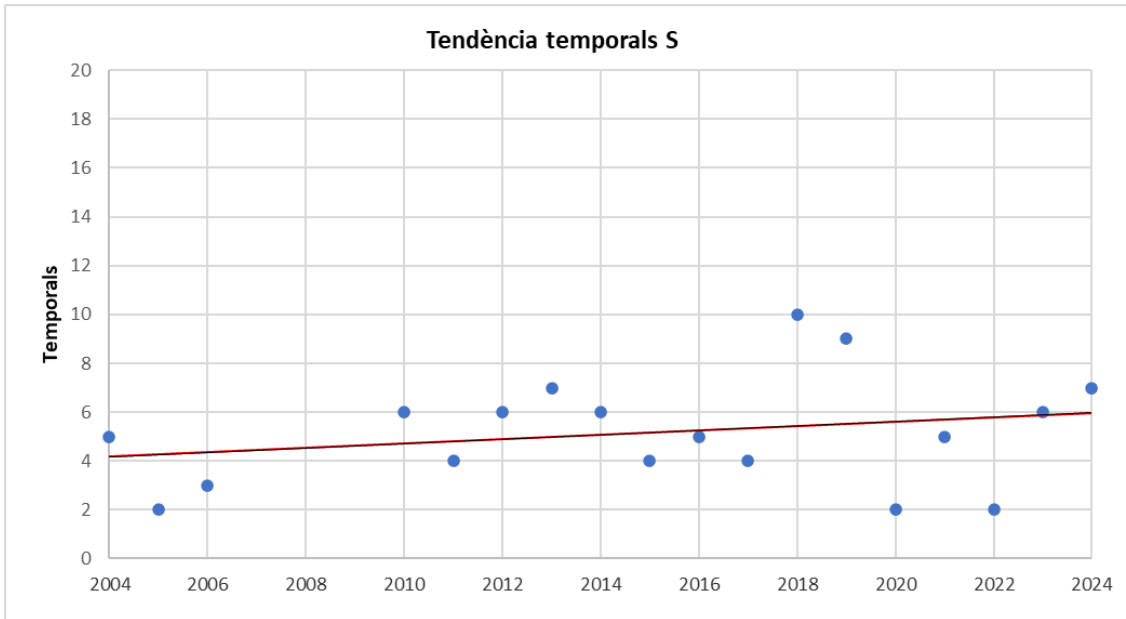
Font: elaboració pròpia.

Figura 20. Tendència del nombre de temporals del sector SSE



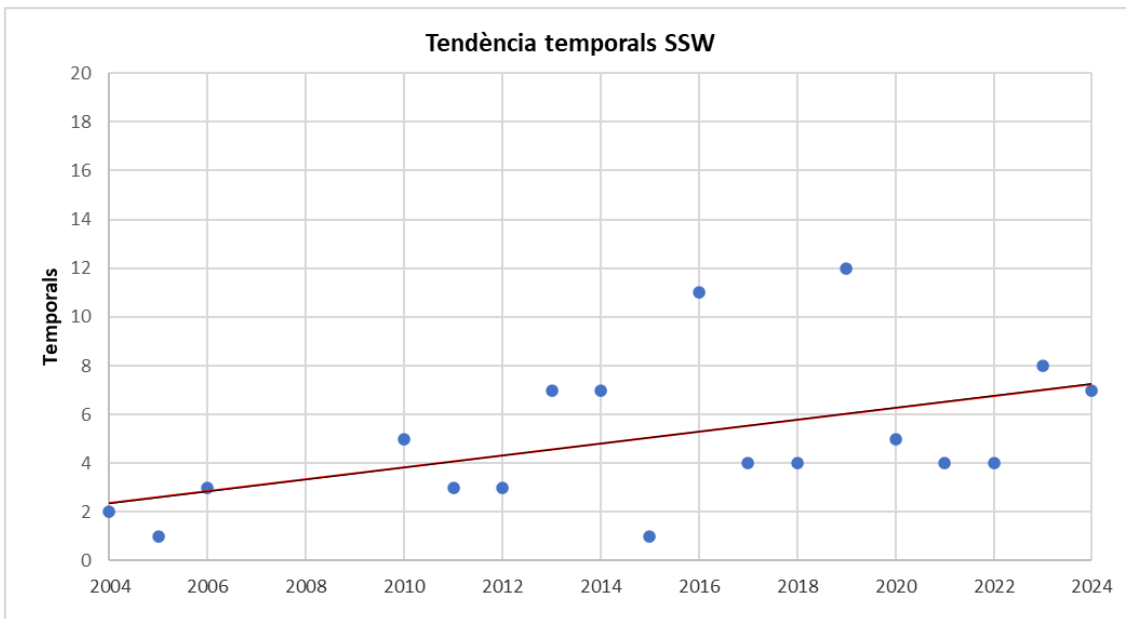
Font: elaboració pròpia.

Figura 21. Tendència del nombre de temporals del sector S



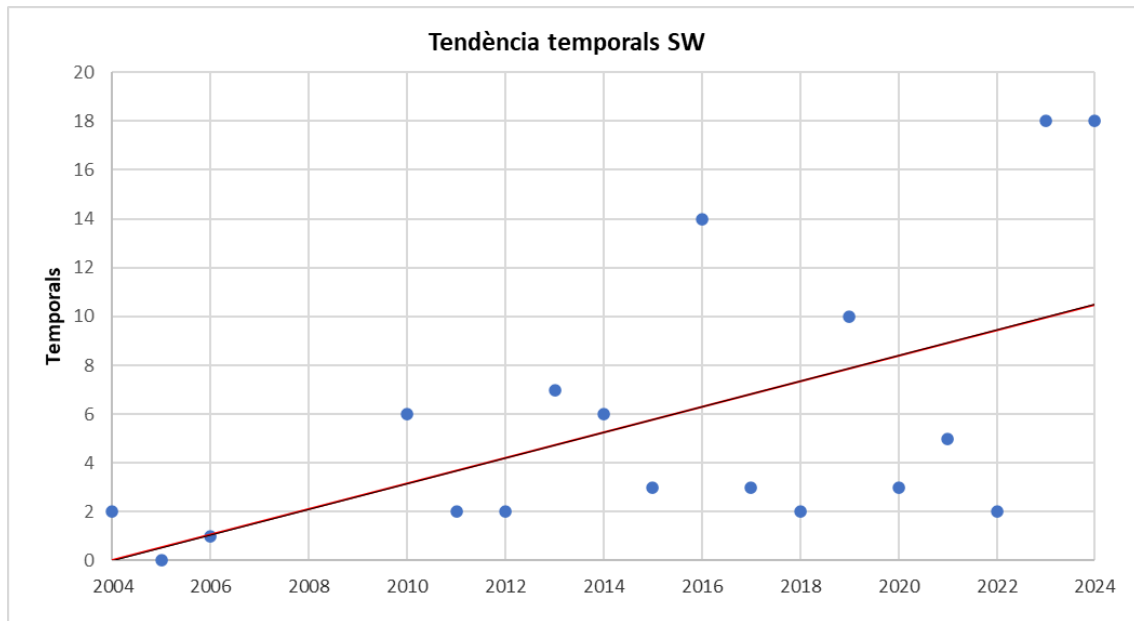
Font: elaboració pròpia.

Figura 22. Tendència del nombre de temporals del sector SSW



Font: elaboració pròpia.

Figura 23. Tendència del nombre de temporals del sector SW



Font: elaboració pròpia.

Com es pot observar, es confirma que el nombre de temporals de llevant es redueix en freqüència, mentre que augmenten els temporals de garbí.

Taula 4. Ràtio de l'augment de temporals per any

	Ràtio de temporals/any
ENE	-0,05
E	-0,17
ESE	-0,09
SE	-0,11
SSE	-0,03
S	0,09
SSW	0,24
SW	0,52

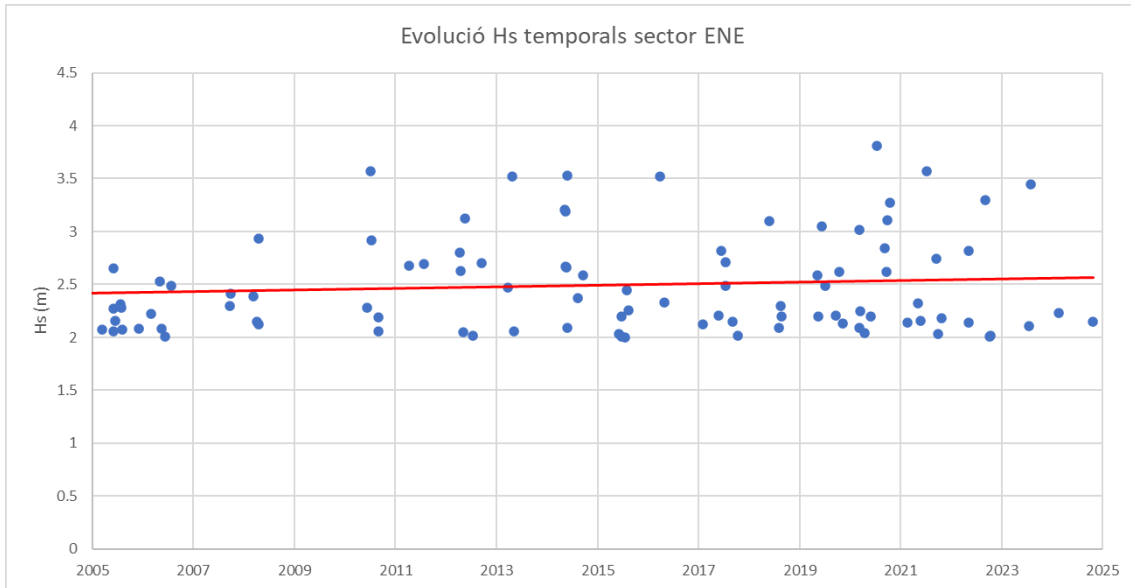
Font: elaboració pròpia.

2.8. Tendències de l'alçària d'onada

Per estudiar l'alçària d'onada es consideren novament tots els temporals separats al llarg de la sèrie de la boia.

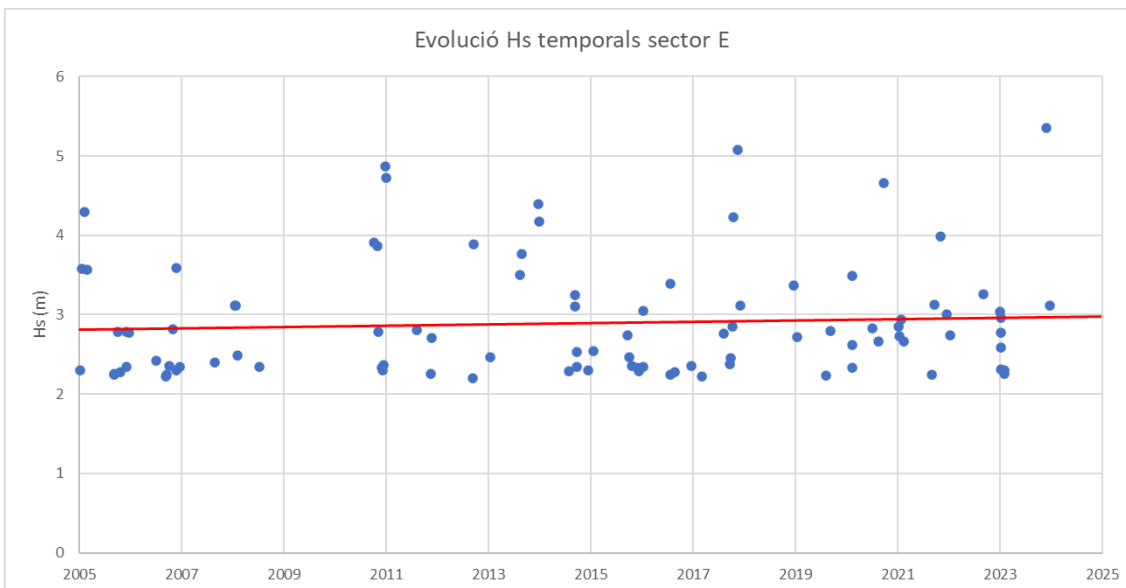
Seguint el mateix procediment, els resultats de les tendències de l'alçària d'onada dels temporals de cada sector es mostren a les figures 24-31.

Figura 24. Tendència de l'alçària d'onada dels temporals del sector ENE



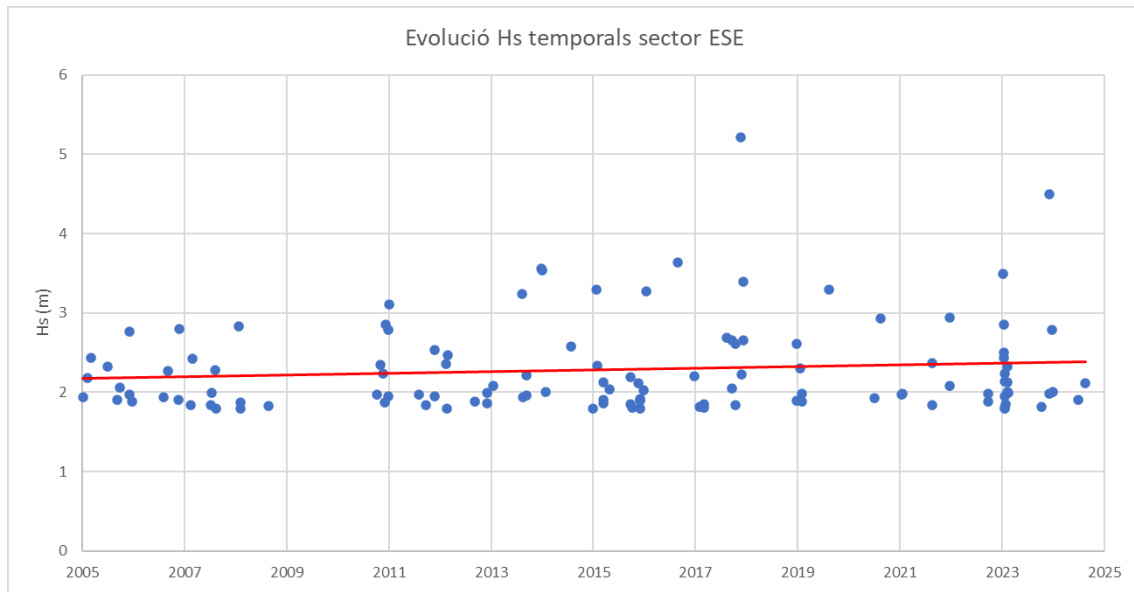
Font: elaboració pròpia.

Figura 25. Tendència de l'alçària d'onada dels temporals del sector E



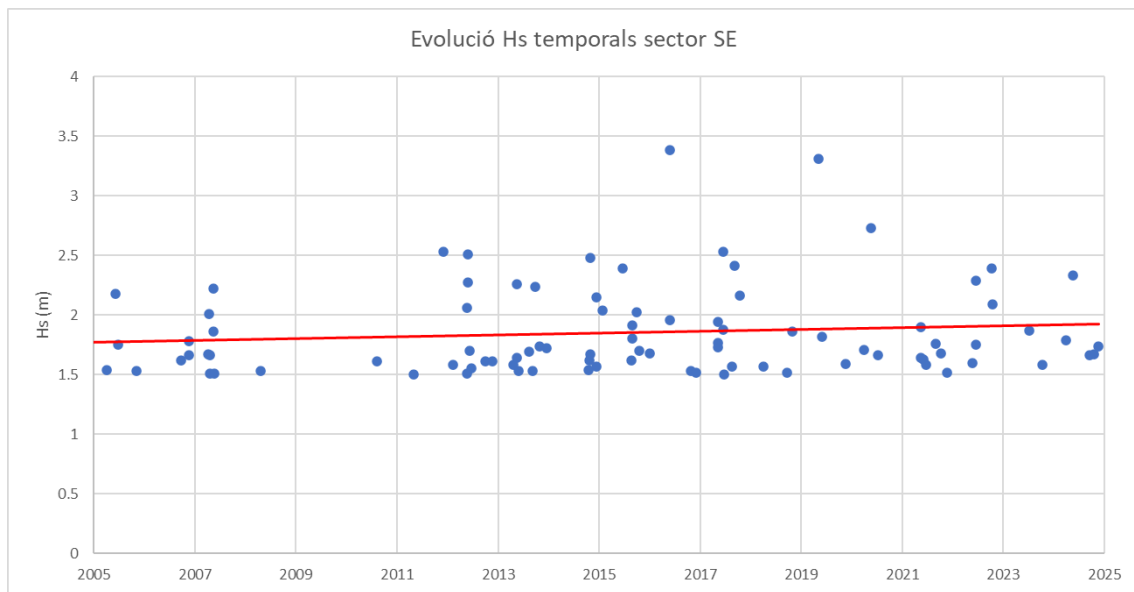
Font: elaboració pròpia.

Figura 26. Tendència de l'alçària d'onada dels temporals del sector ESE



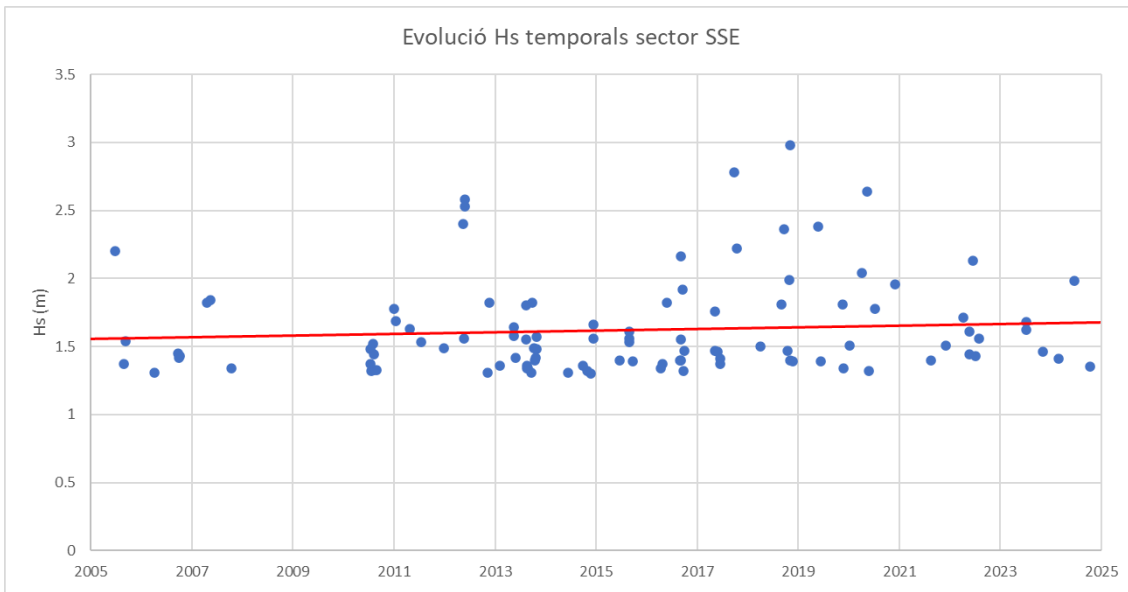
Font: elaboració pròpia.

Figura 27. Tendència de l'alçària d'onada dels temporals del sector SE



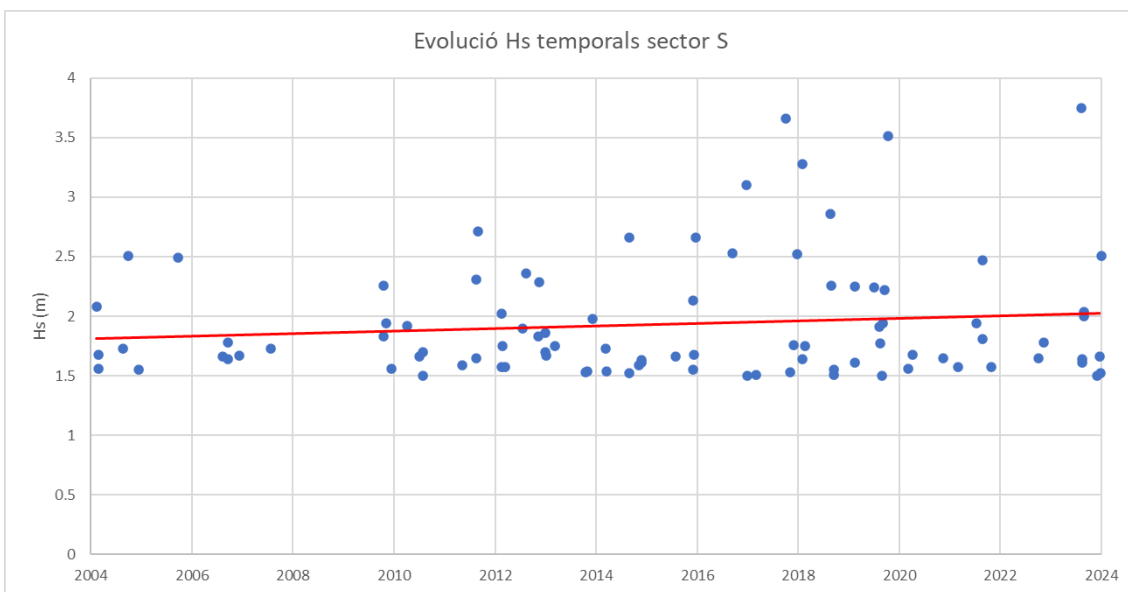
Font: elaboració pròpia.

Figura 28. Tendència de l'alçària d'onada dels temporals del sector SSE



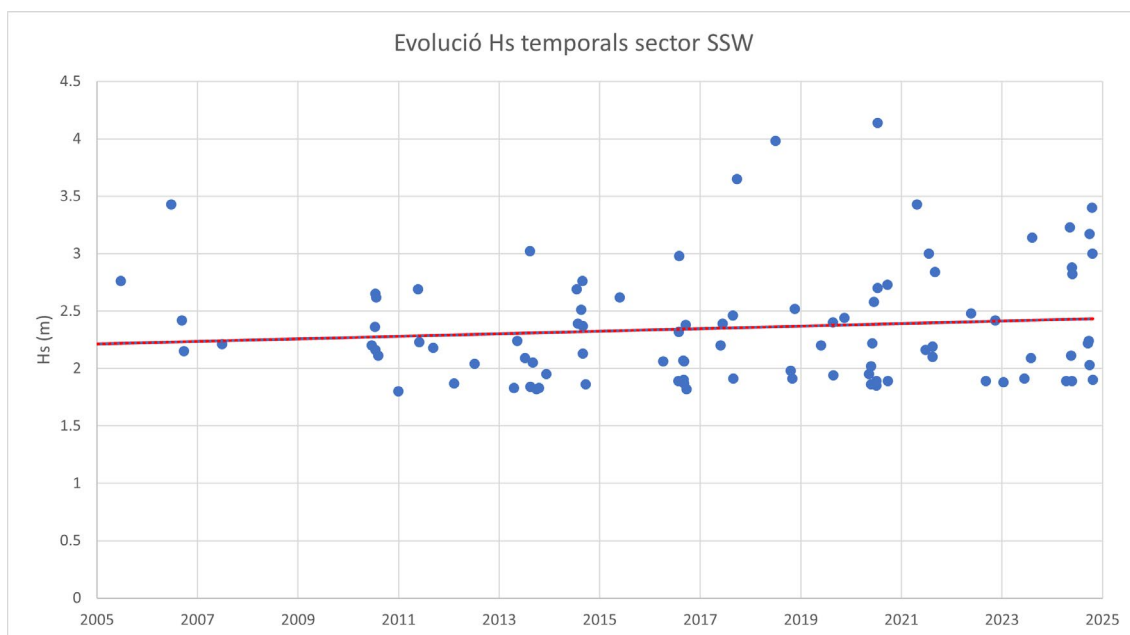
Font: elaboració pròpia.

Figura 29. Tendència de l'alçària d'onada dels temporals del sector S



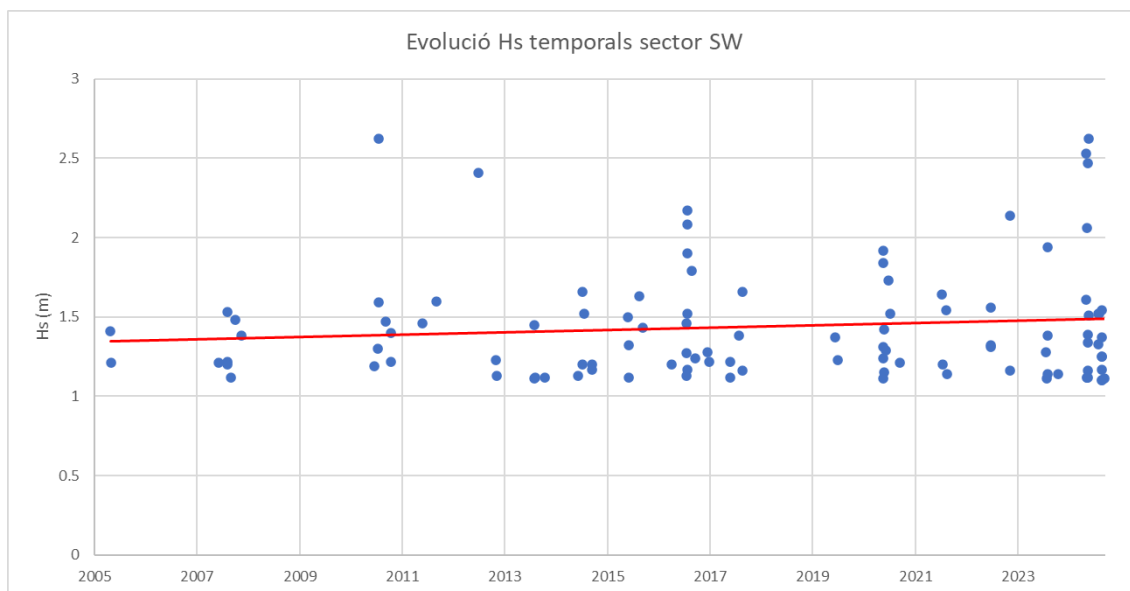
Font: elaboració pròpia.

Figura 30. Tendència de l'alçària d'onada dels temporals del sector SSW



Font: elaboració pròpia.

Figura 31. Tendència de l'alçària d'onada dels temporals del sector SW



Font: elaboració pròpia.

A diferència del que succeïa en el nombre de temporals, en aquest cas els grans augments venen tant dels sectors de llevant com dels del sud, especialment de l'ESE, el S i el SSW. La resta de sectors també han experimentat un increment en l'alçària d'onada dels temporals al llarg dels últims anys.

A la taula 5 es mostren les ràtios d'aquestes tendències en increment d'alçària d'onada dels temporals en centímetres per any i sector.

Taula 5. Ràtio de l'augment de l'alçària d'onada dels temporals per any

	H _s (cm/any)
ENE	0,75
E	0,84
ESE	1,05
SE	0,76
SSE	0,60
S	1,09
SSW	1,10
SW	0,72

Font: elaboració pròpia.

Com es pot observar, es confirma que els sectors que es veuen més afectats són els temporals de llevant en el sector ESE i els temporals de garbí en els sectors S i SSW.

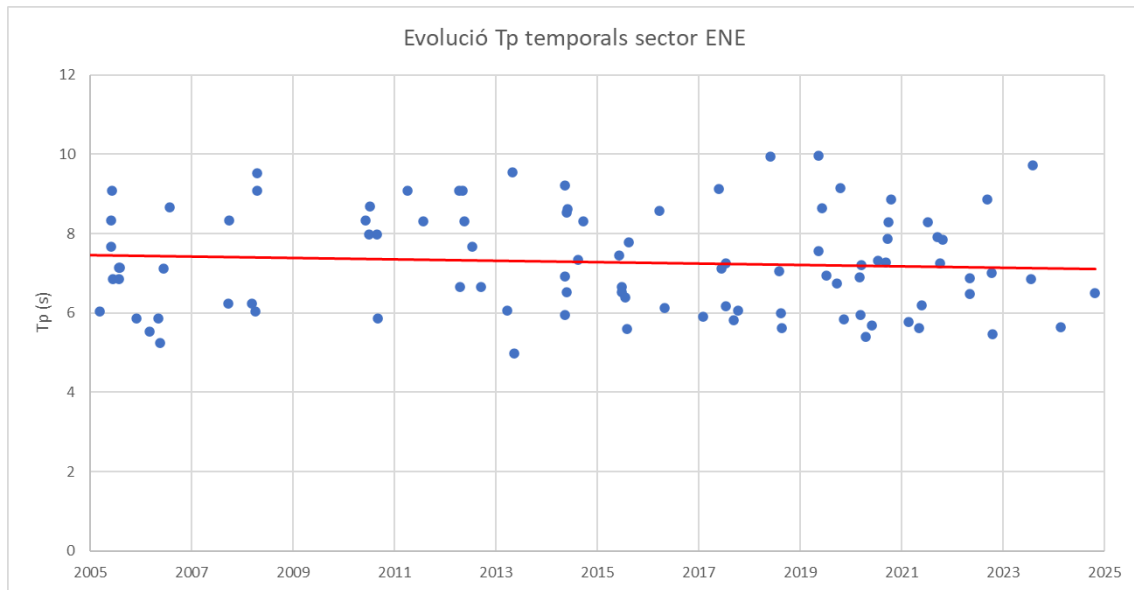
Si es consideren conjuntament l'alçària d'onada i el nombre de temporals, els de llevant creixen en intensitat, però disminueixen en freqüència, i els del sud creixen en freqüència i en intensitat.

2.9. Tendències del període de l'onatge

Seguint el mateix procediment que s'ha aplicat a l'alçària d'onada, s'han considerat tots els períodes dels temporals de cada sector i s'han analitzat any per any, incloent-hi els temporals addicionals a la sèrie horària de la boia de què es disposa.

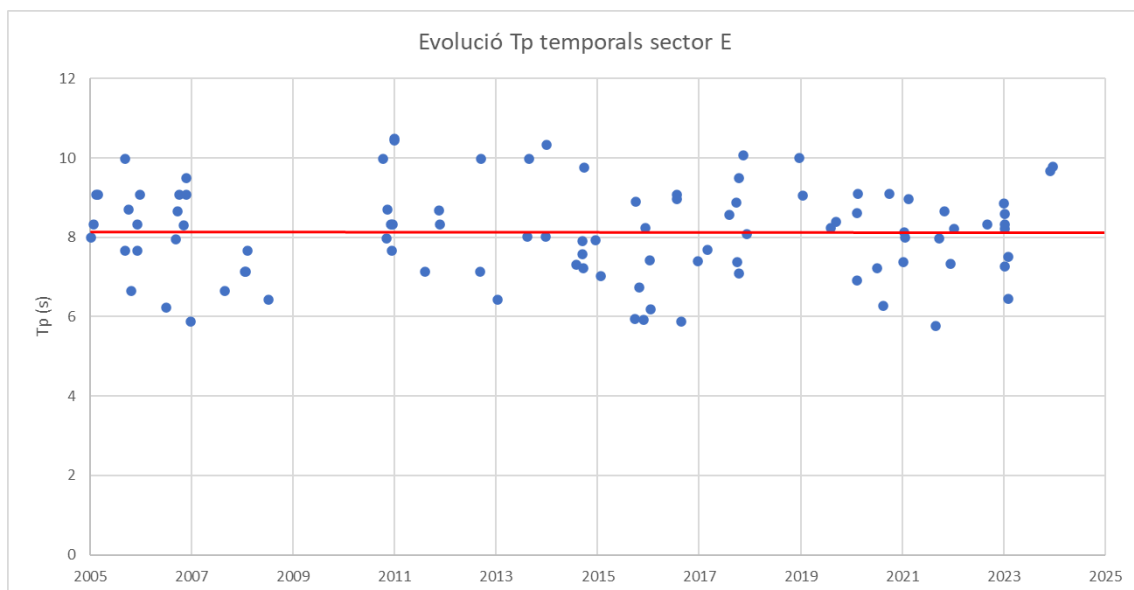
Els resultats de les tendències del període dels temporals de cada sector es mostren a les figures 32-39.

Figura 32. Tendència del període dels temporals del sector ENE



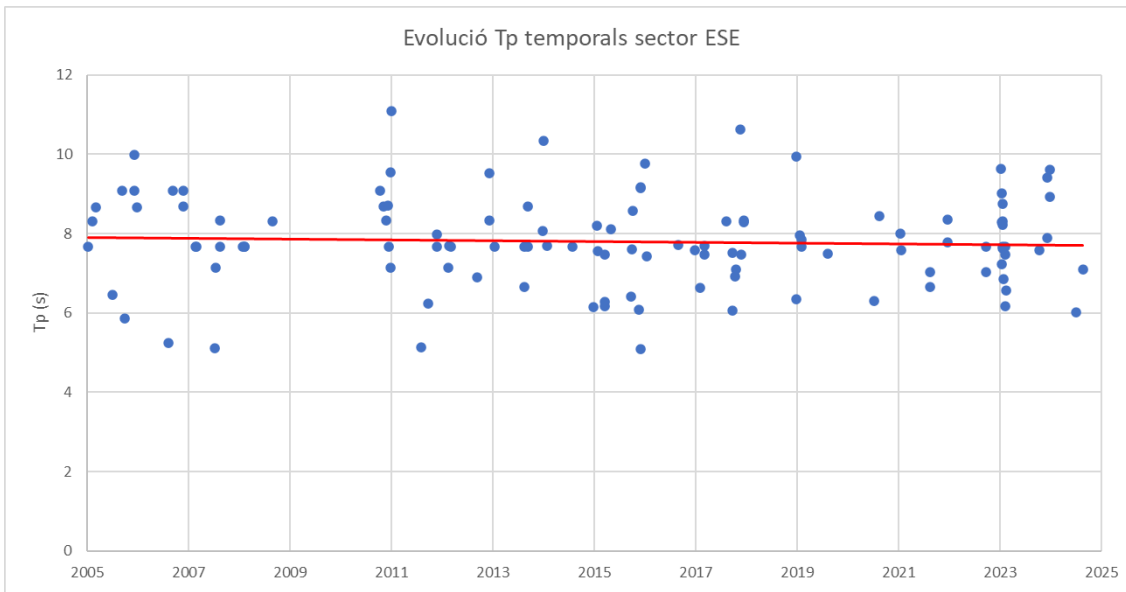
Font: elaboració pròpia.

Figura 33. Tendència del període dels temporals del sector E



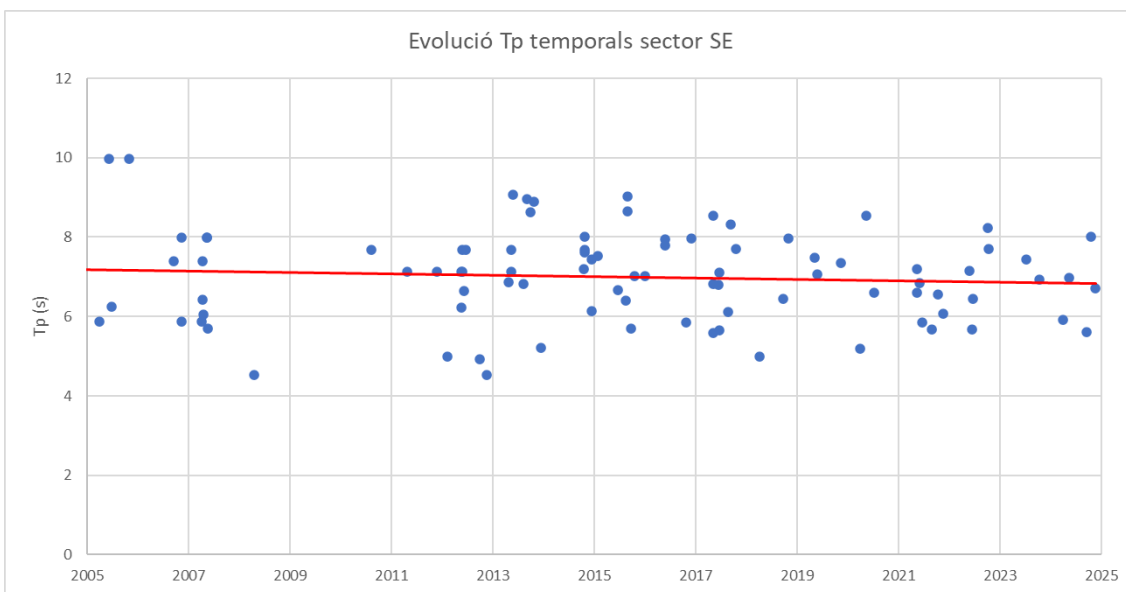
Font: elaboració pròpia.

Figura 34. Tendència del període dels temporals del sector ESE



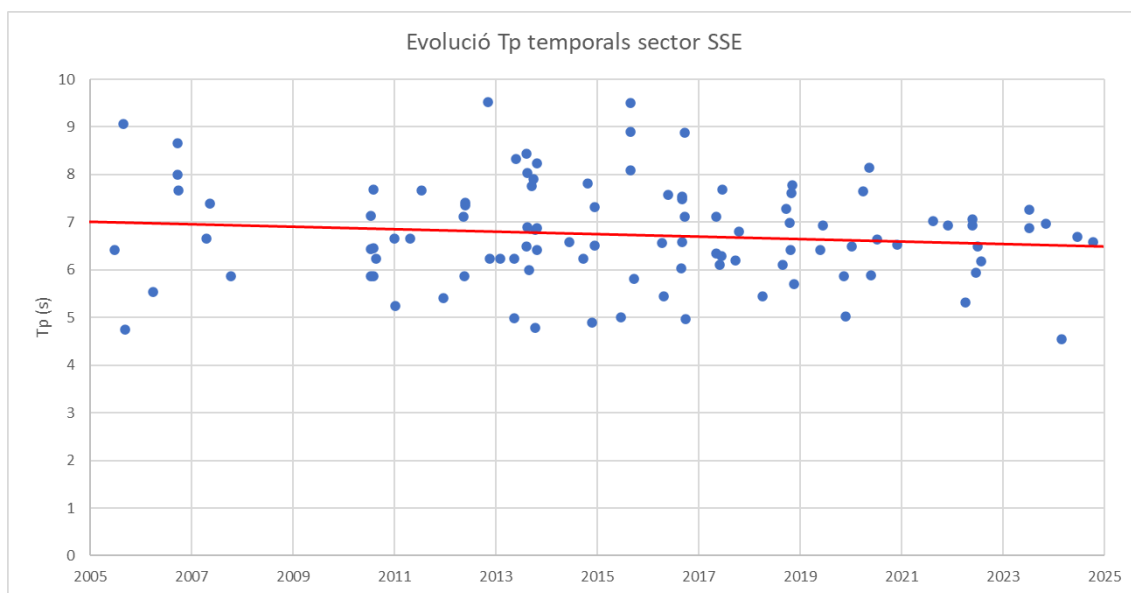
Font: elaboració pròpia.

Figura 35. Tendència del període dels temporals del sector SE



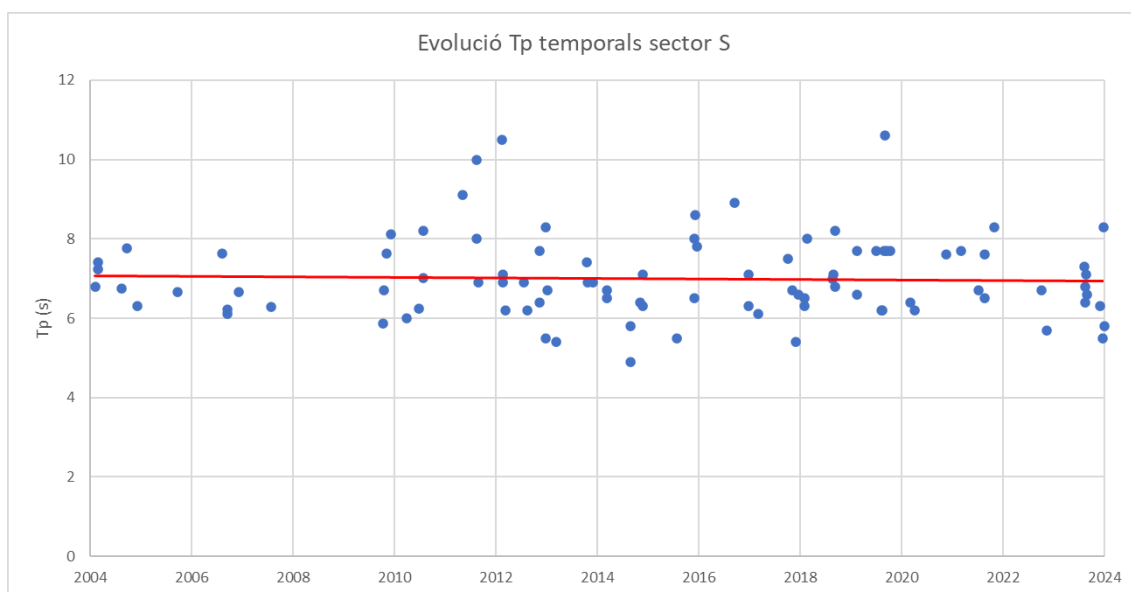
Font: elaboració pròpia.

Figura 36. Tendència del període dels temporals del sector SSE



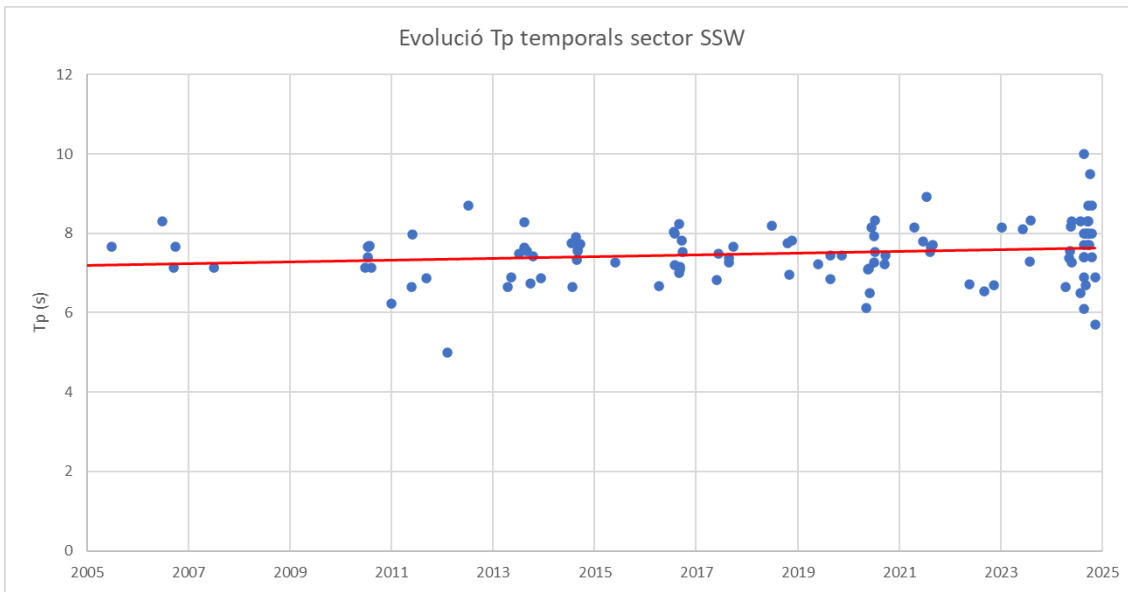
Font: elaboració pròpia.

Figura 37. Tendència del període dels temporals del sector S



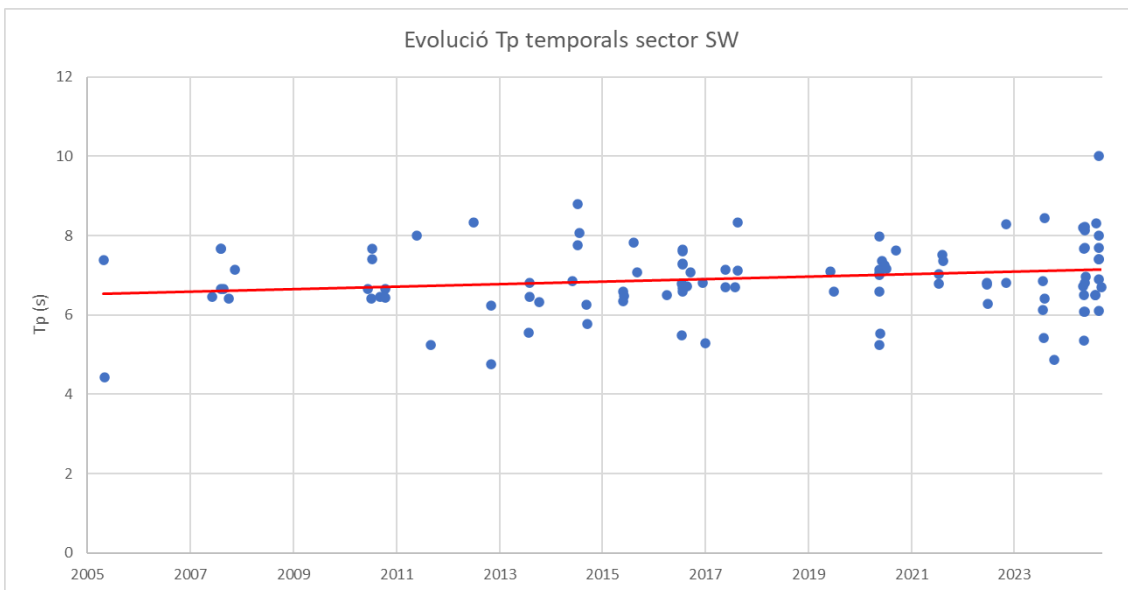
Font: elaboració pròpia.

Figura 38. Tendència del període dels temporals del sector SSW



Font: elaboració pròpia.

Figura 39. Tendència del període dels temporals del sector SW



Font: elaboració pròpia.

Per períodes, la distribució de creixements i decreixements és similar a la dels d'onatges, però un xic més irregular. Els sectors de llevant mantenen una tendència constant, propera a zero, amb un increment o una reducció de no més de gairebé 1 o 2 segons al llarg de la sèrie de divuit anys, mentre que els del sud augmenten el valor.

A la taula 6 es mostren les ràtios d'aquestes tendències en increment del període dels temporals en segons per any i sector.

Es pot observar que als sectors SSE, SSW i SW és on es produeix una variació més gran en valor absolut.

Taula 6. Ràtio de l'augment del període dels temporals per any

	Tp (s/any)
ENE	-0,017
E	-0,001
ESE	-0,010
SE	-0,017
SSE	-0,026
S	-0,008
SSW	0,022
SW	0,032

Font: elaboració pròpia.

Comparant les ràtios de variació dels períodes dels temporals amb les ràtios d'alçària d'onada i amb les del nombre de temporals, els de llevant, que creixien en intensitat però disminuïen en freqüència, es mantenen constants en el període. Els temporals del sud, en canvi, que augmentaven notablement en freqüència i intensitat, també experimenten un increment destacable en el període, encara que en aquest cas només en els sectors SSW i SW.

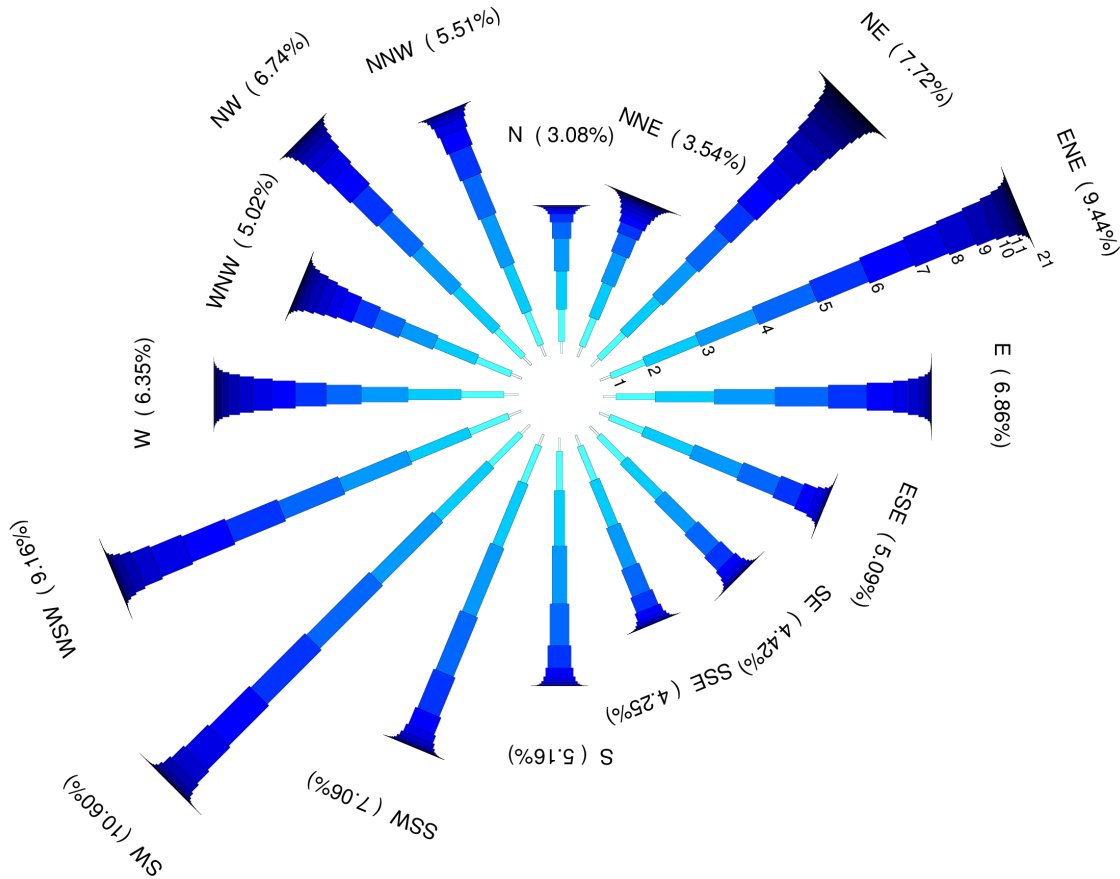
2.10. Distribució sectorial del vent

La distribució sectorial del vent està caracteritzada per mitjà de la rosa dels vents, que discretitza les dades en direccions i velocitat del vent. Cada sector es representa amb un braç de la rosa. La longitud de cada braç és proporcional a la probabilitat de presentació de cada sector, calculada com la freqüència relativa mostral. D'aquesta manera, es pot apreciar visualment quins són els sectors que predominen. La discretització en velocitats permet determinar quins són els sectors més intensos.

A la figura 40 es mostra la rosa dels vents, en la qual s'aprecia que els vents es distribueixen en tots els sectors. Així, els del primer quadrant i els del tercer quadrant són els més freqüents; els del primer quadrant, els més intensos, i els del nord, els més febles i menys freqüents.

A la taula 7 es mostra la taula de relacions entre la velocitat i la direcció del vent. Es pot observar que les intensitats més extremes pertanyen als vents del primer quadrant, en especial del sector NE.

Figura 40. Rosa dels vents



Font: elaboració pròpia.

Taula 7. Taula de relacions entre velocitats (m/s) i direccions de vent

Sector/U	<1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	>18	%	TOTAL	
Calmas																					0.00%	0
N	433	1223	1438	1224	611	313	117	65	56	26	21	24	6	5	1	0	0	0	0	0	3.08%	5563
NNE	426	1146	1384	1197	756	415	297	194	176	125	77	61	55	35	12	15	10	7	2	2	3.54%	6390
NE	411	1313	1803	1840	1630	1290	1152	917	809	696	585	414	340	288	162	105	54	34	81	7.72%	13924	
ENE	435	1374	2177	2354	2357	2083	1820	1370	1088	765	472	319	162	113	60	44	10	13	14	9.44%	17030	
E	481	1481	2226	2297	2003	1456	987	561	394	232	125	75	26	12	6	4	1	2	4	6.86%	12373	
ESE	416	1376	1992	1956	1506	915	526	248	138	49	37	7	6	4	4	1	1	1	0	5.09%	9183	
SE	486	1323	1911	1690	1130	703	329	178	101	54	33	17	3	7	3	0	1	1	0	4.42%	7970	
SSE	436	1390	1855	1664	1103	619	308	135	88	31	22	11	9	3	2	0	0	0	0	4.25%	7676	
S	491	1479	2083	2184	1571	840	331	175	88	42	27	4	1	2	0	0	0	0	0	5.16%	9318	
SSW	444	1518	2569	2784	2416	1590	709	308	180	111	46	29	21	9	6	5	2	0	0	7.06%	12747	
SW	471	1626	2805	3288	3350	2881	2137	1203	638	378	182	87	37	17	11	6	9	1	1	10.60%	19128	
WSW	509	1577	2466	2764	2453	2098	1749	1266	743	401	241	135	69	17	16	10	2	1	3	9.16%	16520	
W	535	1608	1997	1763	1317	1166	862	712	521	401	253	126	94	51	30	20	6	0	1	6.35%	11463	
WNN	436	1396	1687	1352	1056	798	590	459	411	379	218	126	72	55	14	6	6	5	1	5.02%	9067	
NW	425	1427	2147	2086	1705	1333	1070	729	470	294	204	119	79	29	15	7	1	0	0	6.74%	12156	
NNW	443	1342	1897	2006	1608	1114	701	397	203	128	53	33	6	5	0	0	0	0	0	5.51%	9936	
%	4.03%	12.52%	17.98%	17.98%	14.73%	10.87%	7.58%	4.94%	3.38%	2.28%	1.45%	0.88%	0.55%	0.36%	0.19%	0.12%	0.06%	0.04%	0.06%	100.00%		
TOTAL	7278	22599	32437	32449	26572	19614	13685	8917	6104	4112	2612	1587	986	652	342	223	103	65	107		180444	

Font: elaboració pròpia.

2.11. Règim mitjà del vent

L'objectiu de l'estudi del règim mitjà és caracteritzar la probabilitat de no superar diferents nivells de velocitat del vent en un any mitjà. Això es fa mitjançant l'ajust de la mostra dels valors de velocitat a una funció de distribució acumulada. La funció que s'utilitza habitualment per caracteritzar el règim mitjà de vent és la distribució Weibull de mínims.

La funció de distribució acumulada de la funció de Weibull és:

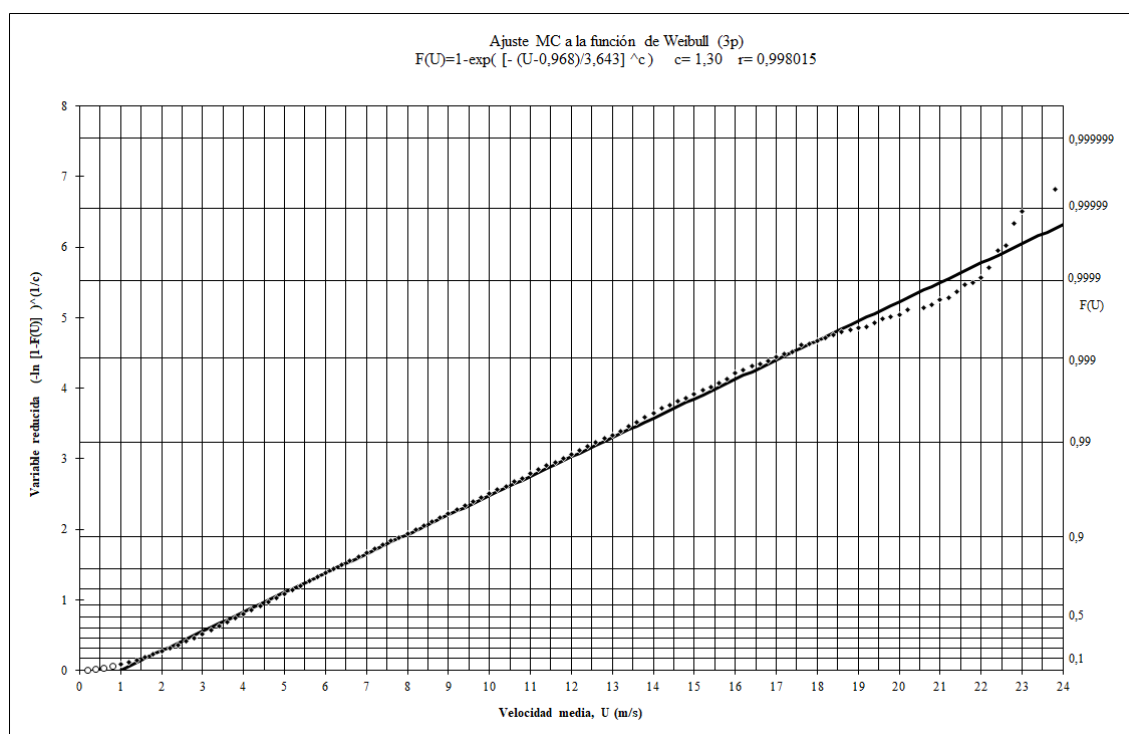
$$P[H_s \leq h] = 1 - \exp\left[-\left(\frac{h - A}{B}\right)^C\right]$$

On A és el paràmetre de posició, B és el paràmetre d'escala i C és el paràmetre de forma. Els tres paràmetres d'aquesta distribució s'han calculat amb el mètode dels moments.

Per determinar el règim mitjà escalar del vent, s'ha ajustat la mostra proposada per a totes les dades del node a una distribució de Weibull de mínims. A la figura 5 es pot veure l'ajust. El valor estimat dels paràmetres de la distribució ha estat: A = 0,968, B = 3,643 i C = 1,30.

Aquestes distribucions es poden utilitzar només per a condicions mitjanes; per obtenir un ordre de magnitud, la probabilitat que l'alçària d'onada no sigui superada més de 12 hores per any és de 0,9986, la de 48 hores és de 0,9945 i la d'una setmana és de 0,9808. Per tant, aquestes distribucions s'han de fer servir per a valors de probabilitat d'excedència situats a la part central de l'ajust, on els valors de la velocitat freqüen els 8 m/s.

Figura 41. Règim mitjà escalar del vent



Font: elaboració pròpia.

2.12. Tendències de la velocitat del vent

Els ajustos de les tendències del règim de vents s'han fet per als set sectors més representatius: el NE, l'ENE, l'E, l'ESE, el SE, el SSE, el S, el SSW, el SW i l'WSW. A partir dels llindars del mètode POT, s'obté una mostra d'extrems per a cada sector i el nombre de tempestes a l'any. Tots aquests valors es resumeixen a la taula 8.

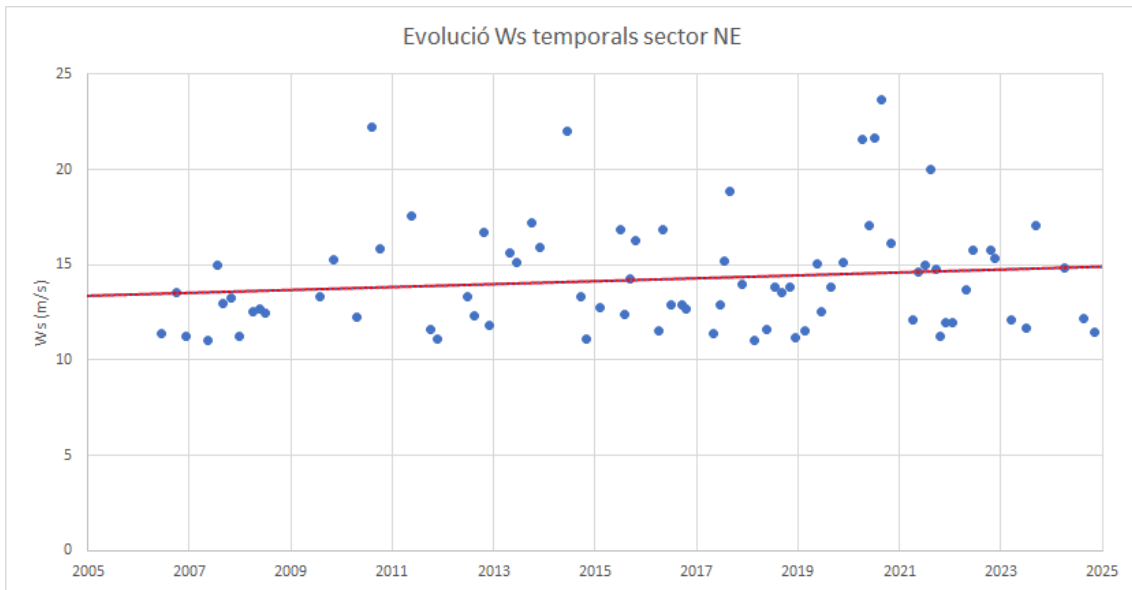
Taula 8. Paràmetres de la selecció d'extrems de vent pel mètode POT

Sector	Ws POT	Nre. temp.
NE	11	83
ENE	11	118
E	10	83
ESE	8	115
SE	8	92
SSE	7,5	94
S	7,5	101
SSW	8	112
SW	10	95
WSW	9	95

Font: elaboració pròpia.

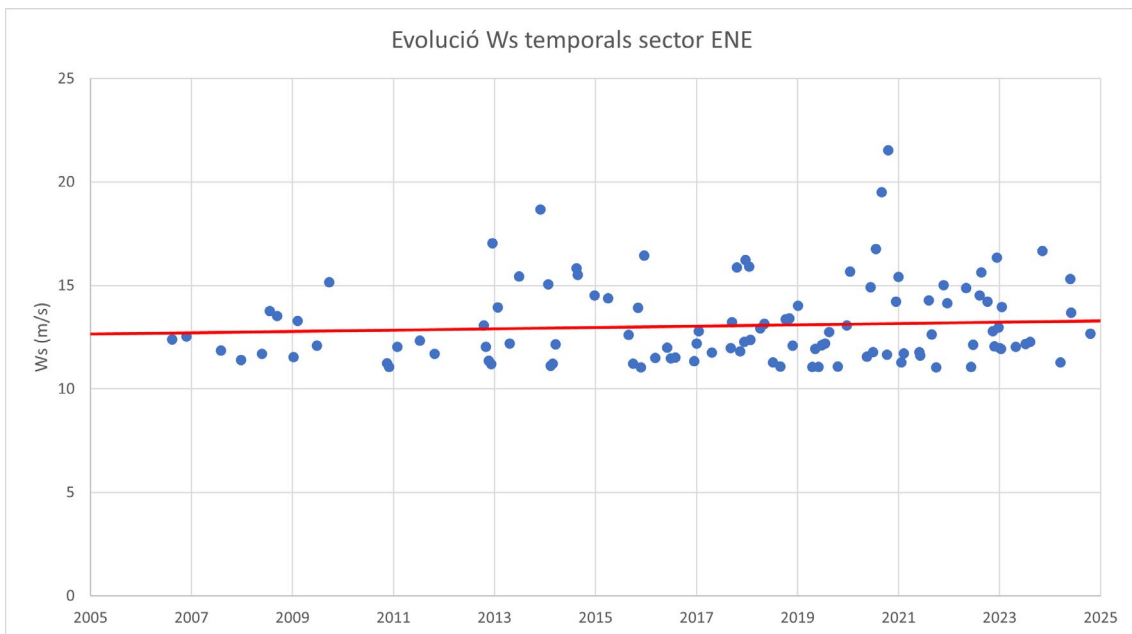
Els resultats de les tendències en la velocitat del vent de cada sector es mostren a les figures 42-51.

Figura 42. Tendència de la velocitat del vent dels temporals del sector NE



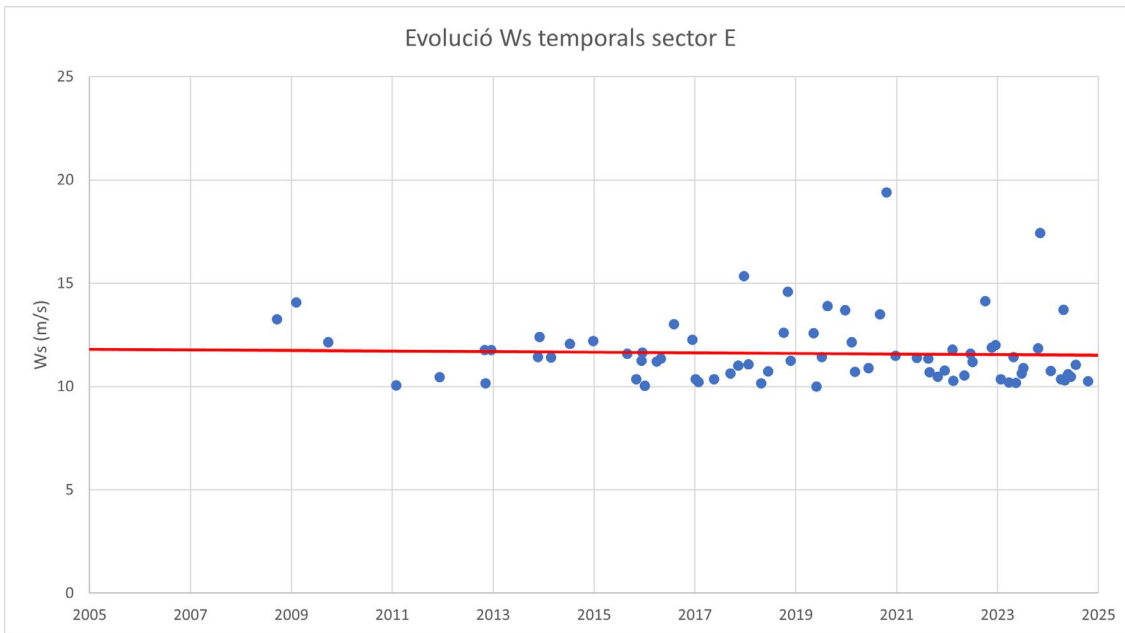
Font: elaboració pròpia.

Figura 43. Tendència de la velocitat del vent dels temporals del sector ENE



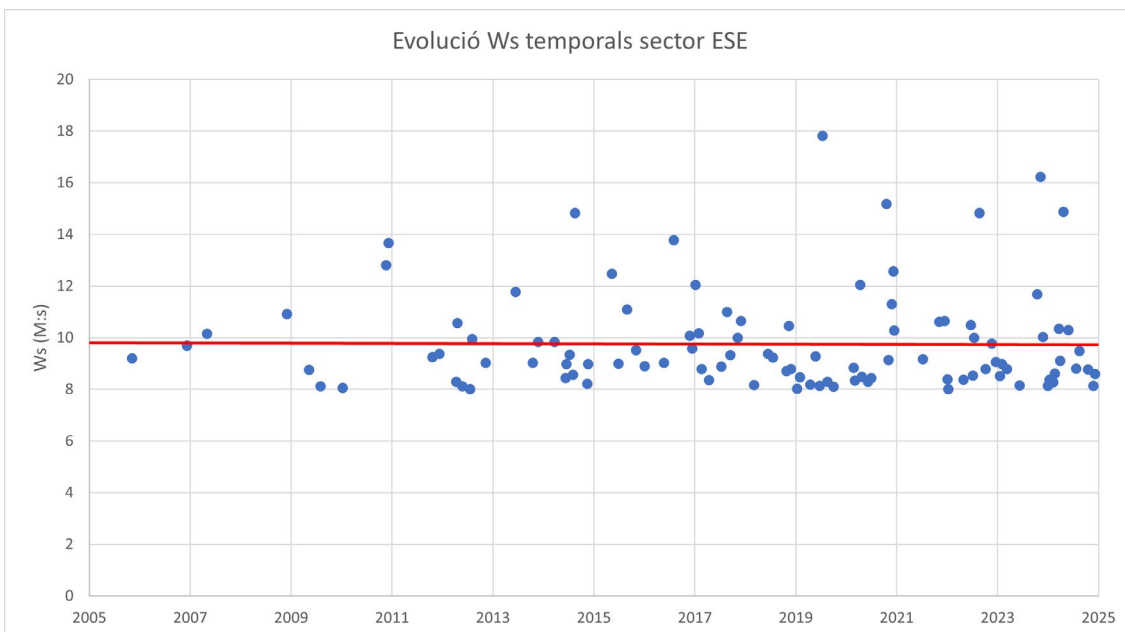
Font: elaboració pròpia.

Figura 44. Tendència de la velocitat del vent dels temporals del sector E



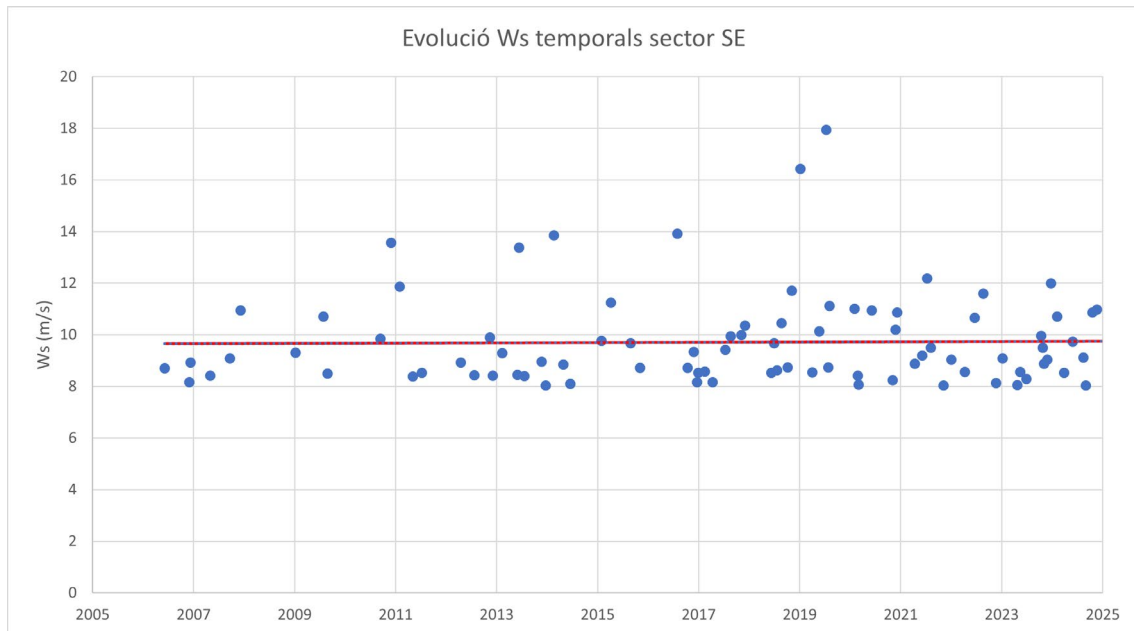
Font: elaboració pròpia.

Figura 45. Tendència de la velocitat del vent dels temporals del sector ESE



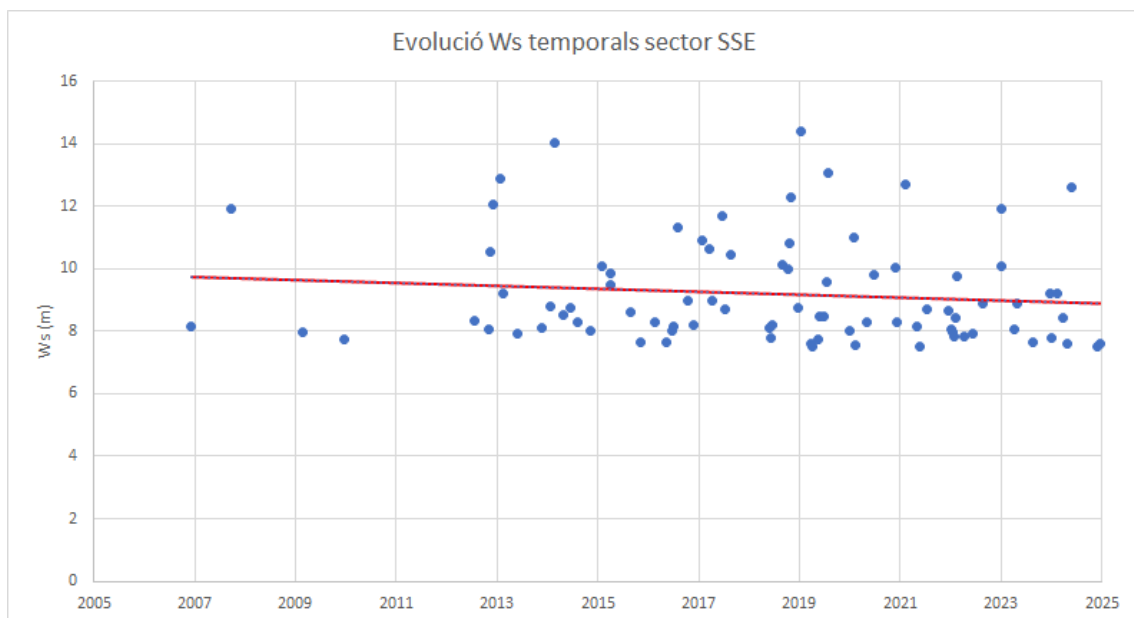
Font: elaboració pròpia.

Figura 46. Tendència de la velocitat del vent dels temporals del sector SE



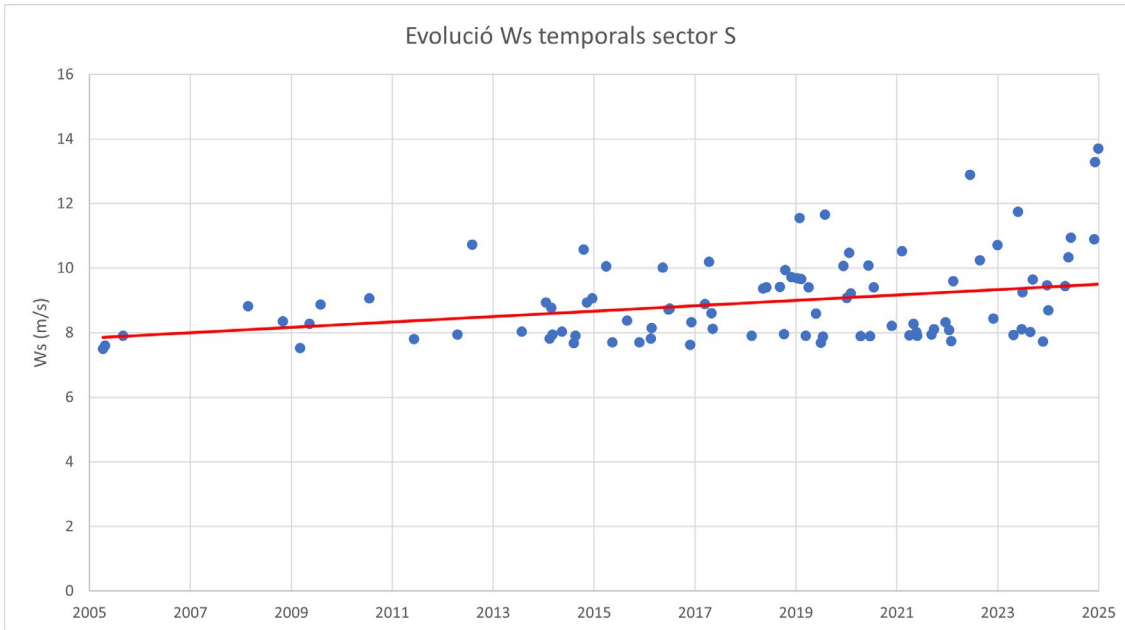
Font: elaboració pròpia.

Figura 47. Tendència de la velocitat del vent dels temporals del sector SSE



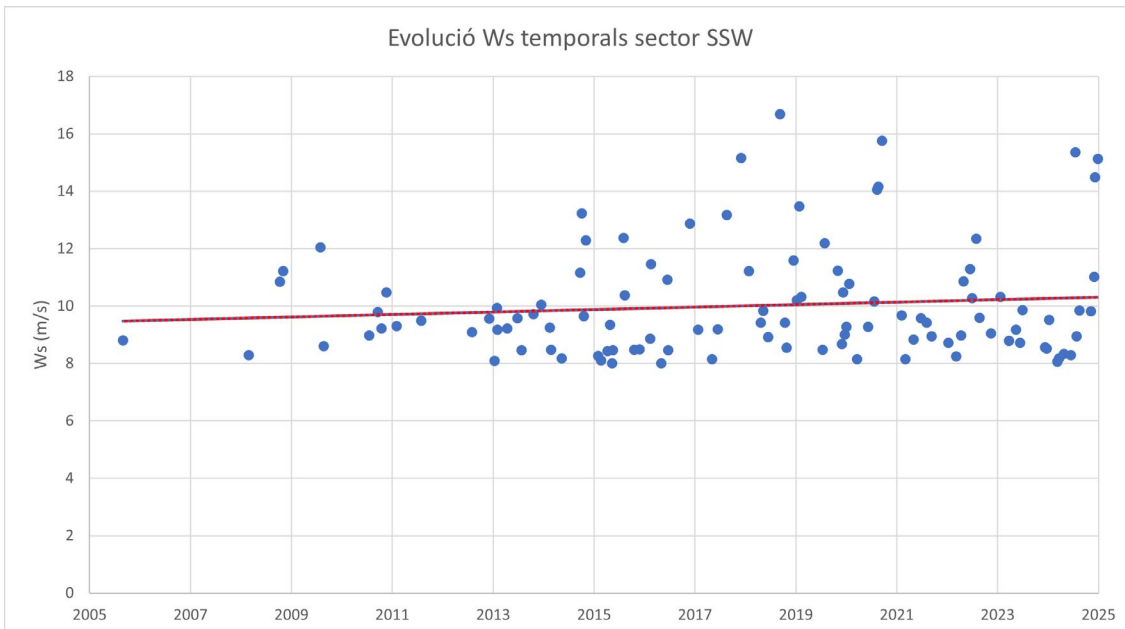
Font: elaboració pròpia.

Figura 48. Tendència de la velocitat del vent dels temporals del sector S



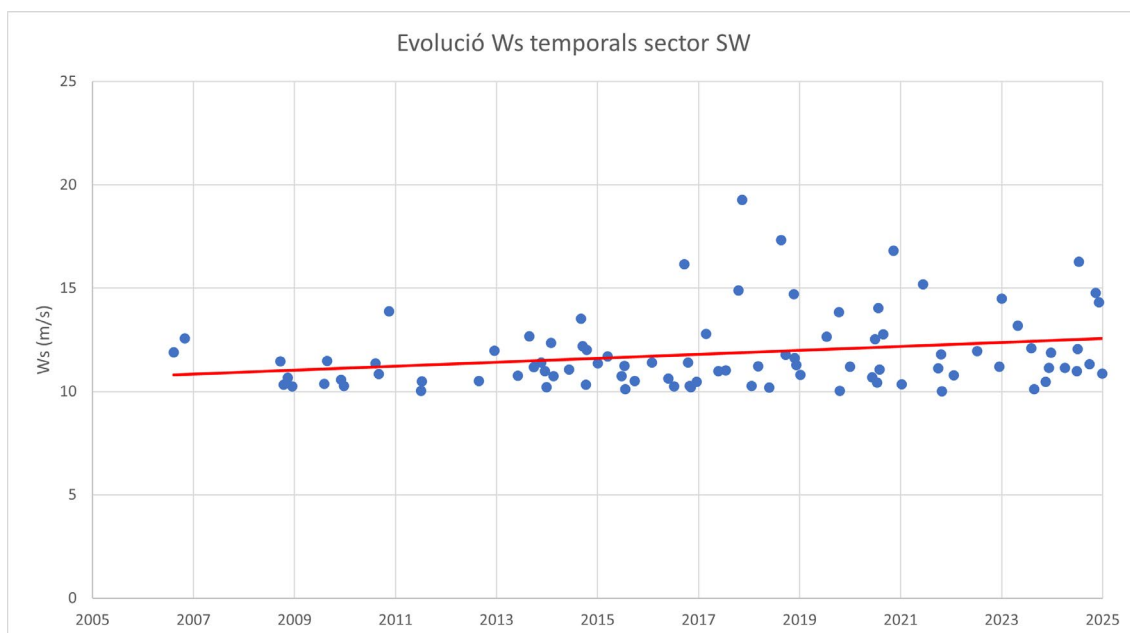
Font: elaboració pròpia.

Figura 49. Tendència de la velocitat del vent dels temporals del sector SSW



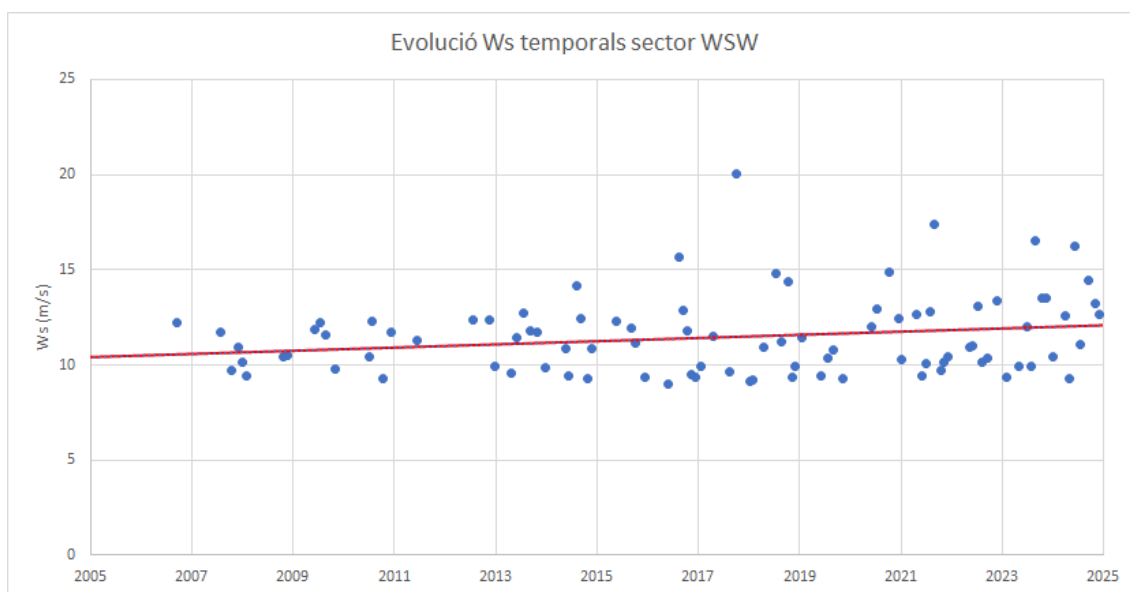
Font: elaboració pròpia.

Figura 50. Tendència de la velocitat del vent dels temporals del sector SW



Font: elaboració pròpia.

Figura 51. Tendència de la velocitat del vent dels temporals del sector WSW



Font: elaboració pròpia.

Tal com s'observa a les figures anteriors, els vents més freqüents i intensos, els dels sectors NE i ENE, tendeixen a augmentar en intensitat, igual que els vents del tercer quadrant (sectors del S a l'WSW). En canvi, els vents de llevant i els del segon quadrant (sectors de l'E al SSE) o bé mostren una tendència a reduir-se en intensitat o pràcticament es mantenen.

A la taula 9 es mostren les ràtios d'aquestes tendències en increment de velocitat del vent en metres per segon per any i sector.

Taula 9. Ràtio de l'augment de la velocitat del vent dels temporals per any

	Ws (m/s/any)
NE	0,076
ENE	0,032
E	-0,014
ESE	-0,005
SE	0,006
SSE	-0,048
S	0,084
SSW	0,043
SW	0,095
WSW	0,083

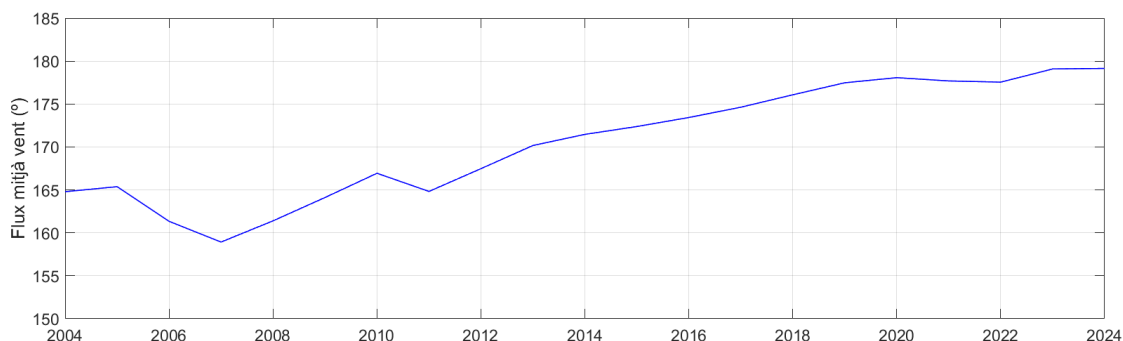
Font: elaboració pròpia.

2.13. Tendències del flux energètic mitjà de vent

Així com amb l'onatge s'han analitzat les condicions mitjanes del vent, i s'ha obtingut la variable de flux energètic mitjà del vent de manera equivalent al flux energètic mitjà de l'onatge, en aquest cas la direcció del vent s'ha estandarditzat amb la velocitat del vent en lloc del factor $H_s^2 \cdot T_p$. Així es compon la sèrie de flux mitjà.

A la figura 52 es mostra l'evolució del flux energètic mitjà del vent al llarg dels anys. Igual que passava amb l'onatge, l'any 2004 no és representatiu, perquè només conté dades de l'any, però, a mesura que avancem, es van acumulant les dades de flux mitjà i la línia comença a estabilitzar la tendència.

Figura 52. Evolució del flux energètic mitjà acumulat



Font: elaboració pròpia.

A la gràfica anterior es poden veure les fluctuacions pròpies dels primers anys per la falta de dades acumulades. Així i tot, ràpidament comença un creixement constant, que mostra un gir dels vents cap al sud, el qual sembla que en els darrers anys tendeix a estabilitzar-se a prop dels 180°. El que s'observa clarament és que el flux energètic mitjà ha virat prop de 15° en els últims quinze anys. Això vol dir que l'energia del vent, de manera mitjana, s'està desplaçant cada cop més al sud.

2.14. Altres consideracions

Finalment, és important remarcar que la mostra d'extremes utilitzada a l'apartat anterior, i, de fet, en tota l'anàlisi del clima marítim, es compon principalment per les dades de la boia de Barcelona II, però complementades amb les de la boia del Llobregat, ja que totes dues fonts tenen dades direccionals des del 2004, si bé l'última conté dades fins a l'actualitat i, per tant, mostra un registre més llarg i més complet.

En el període 2004-2020 hi ha hagut forts temporals, dels quals es recorden el del desembre del 2008, el del gener del 2017 i, recentment, el del 2020, tots tres de llevant i que van provocar importants danys i desperfectes a la costa central.

Malauradament, durant el 2008 la boia de Barcelona II va estar inoperativa, per la qual cosa no va registrar aquest temporal, però, en canvi, sí que ho va fer la boia del Llobregat, que va mesurar un pic de $H_s = 4,39$ m i $T_p = 13,3$ s. Per al cas del 2020, cap boia no va registrar dades del temporal.

Amb l'objectiu d'incorporar el temporal del 2008 a l'anàlisi del clima marítim anterior, s'ha transformat el registre complet del temporal (dies 26, 27, 28 i 29 de desembre) des de la ubicació d'una boia fins a l'altra. Tal com s'exposarà a l'apartat següent, s'ha emprat una malla de propagació de l'onatge en què els dos punts de mesura estiguin inclosos, a fi de relacionar els valors entre ambdues fonts de dades.

El model numèric s'alimenta de les dades en els contorns de la malla, de manera que s'assoleix per mitjà d'un procés iteratiu que s'inicia amb el valor d'onatge aproximat als límits de la malla. Tot seguit, es comprova quin valor s'obté al punt de la ubicació de la boia del

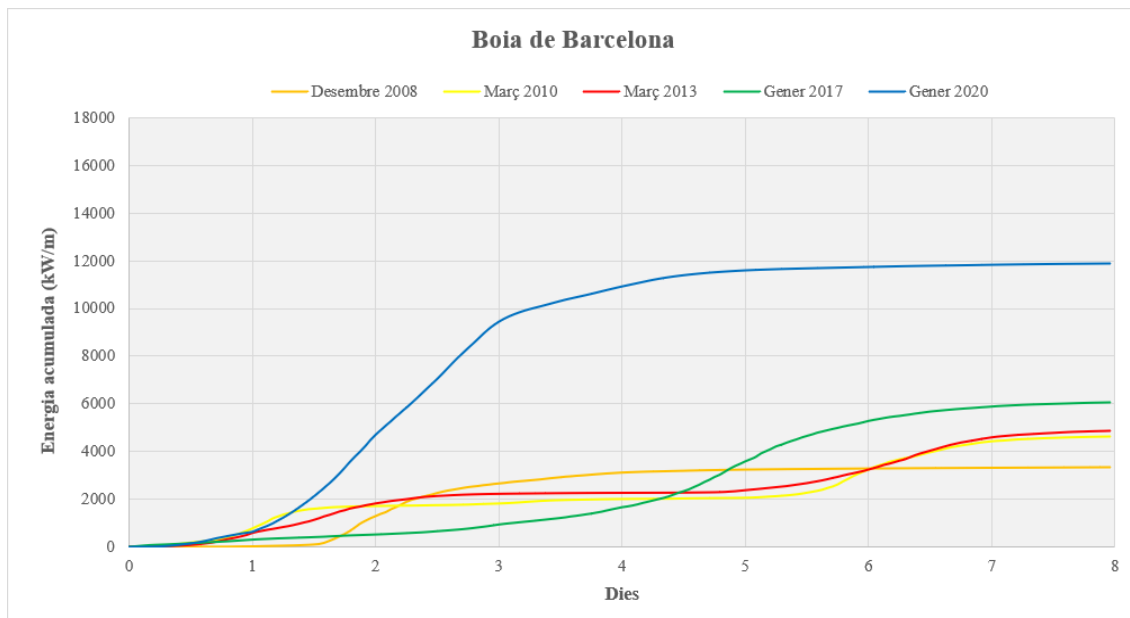
Llobregat, tant d'alçària d'onada com en direcció, mantenint-ne el període, i es modifiquen els valors en els contorns de la malla fins a obtenir el valor desitjat, en aquest cas en el punt de la boia de Barcelona II. Un cop fet aquest ajust, es comprova quin valor d'onatge es produeix a la ubicació de l'altra boia, d'on es defineix el valor obtingut.

Com que la boia del Llobregat es troba en un calat inferior al de la boia de Barcelona II, després de traslladar a dades el temporal sencer (de quatre dies), es va obtenir un valor de pic a la boia de Barcelona II de $H_s = 4,92$ m i $T_p = 13,3$ s. Això el converteix en el tercer temporal amb més alçària d'onada, per darrere del de gener de 2017, que va arribar als 5 m, i del temporal associat a la borrasca Gloria el 2020, que també s'ha hagut de reconstruir.

En aquest cas, el temporal Gloria es va reconstruir a partir de les dades de mesura dels nodes SIMAR, que, un cop corregits després de comparar tot el registre amb els valors mesurats per la boia de Barcelona II, van permetre assimilar les dades del temporal sencer a la ubicació de la boia. En aquest cas, es va obtenir un valor de pic a la boia de Barcelona II de $H_s = 6,46$ m i $T_p = 12,1$ s.

D'acord amb les dades dels grans temporals reconstruïts o mesurats per la boia de Barcelona II, s'ha fet l'exercici de comprovar l'energia associada a cadascun, acumulada en un període de vuit dies (vegeu la figura 53). S'aprecia que el temporal del 2020 va ser clarament el més energètic que hagi colpejat mai la costa barcelonina des que se'n tenen registres. Cal destacar que cada temporal extrem ha descarregat més energia que l'anterior, la qual cosa corrobora que l'efecte de l'escalfament global afecta les tempestes, que arriben cada cop més intenses a la costa barcelonina.

Figura 53. Energia acumulada en 8 dies pels temporals més forts mesurats a Barcelona



Font: elaboració pròpia.

2.15. Nivell mitjà del mar

En darrera instància, s'analitza el nivell mitjà del mar. Aquesta anàlisi s'ha dut a terme a partir de les dades del mareògraf de Barcelona, amb una sèrie històrica de gairebé 32 anys, que va des del gener de 1993 fins a l'actualitat.

Pel que fa als efectes del canvi climàtic, és important destacar que tota la documentació parteix de les conclusions del sisè informe d'avaluació de l'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) elaborat el 2021, *Climate Change 2021. The Physical Science Basis*.

Alhora, també es consulta l'*Atlas de cota de inundación del litoral peninsular español* (ACI), desenvolupat pel Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas (GIOC) de la Universitat de Cantàbria (UNICAN).

2.15.1. Marea astronòmica i meteorològica

Les dades del mareògraf de Barcelona indiquen que a les costes catalanes tenim un règim mareal mixt, amb predominança semidiürna. El clau geodèsic més proper és el 146, situat sobre la cantonada dreta de la base de formigó del mareògraf i anivellat per l'Institut Cartogràfic de Catalunya el 2011. El zero del mareògraf coincideix amb el zero del sensor acústic del mareògraf després l'ajust de les dades durant el 2008, abans de l'anivellament, i està situat 4,419 m sota el clau 146, coincidint amb el nivell mitjà del mar a Alacant o NMMA (excepte un parell de centímetres) el 1995 i 0,214 m per sobre de l'anomenat *zero del port*.

Després de les dades de l'últim anivellament de l'Institut Cartogràfic de Catalunya, la relació d'aquest clau amb el NMMA ha canviat substancialment, i el nou NMMA passa a estar 0,179 m per sobre de l'anterior. Es desconeix l'origen d'aquesta diferència, però no està relacionada amb el funcionament del mareògraf, sinó amb el procés d'anivellament o moviments verticals no coneguts en aquest moment. El zero hidrogràfic està situat 4,469 m sota aquest clau (vegeu la figura 54).

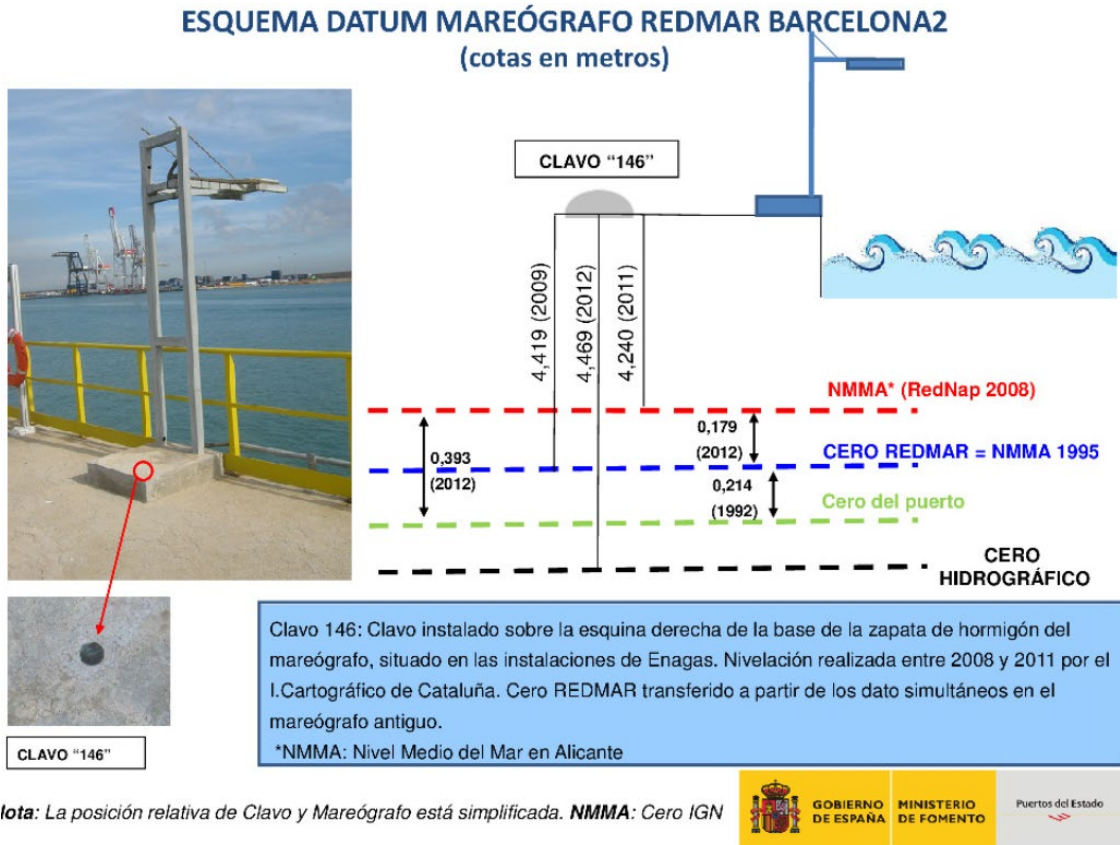
El clau de referència és el més proper al mareògraf al qual ha arribat la línia d'anivellament d'alta precisió de l'Institut Geogràfic Nacional (IGN). El NMMA és l'origen d'altituds a terra establert per l'IGN i que a la península Ibèrica procedeix del nivell mitjà del mar a Alacant durant la dècada del 1870-1880. El zero hidrogràfic establert per l'Institut Hidrogràfic de la Marina (IHM) coincideix aproximadament amb el nivell d'aigua més baix i varia amb les característiques de la marea al llarg de la costa. És la mínima baixamar astronòmica (BMMI) calculada per al port per l'IHM. El zero del port està definit pel mateix port i coincideix normalment amb la mínima baixamar. Mentre que el zero REDMAR, zero de les mesures dels mareògrafs, sol coincidir amb el zero del port.

En condicions mitjanes, es pot considerar una amplitud de la marea astronòmica de 0,21 m, fins a arribar a un màxim de 0,47 m, resultat de la diferència entre la mínima marea astronòmica i la màxima.

D'altra banda, s'ha de considerar la composició de la marea astronòmica amb la meteorològica, de la qual, tenint en compte tant les dades del mareògraf com les recollides a

l'atles d'inundació, els valors extrems poden arribar a ser gairebé d'1 m, i els valors mitjans, de 30 cm (vegeu la figura 55 i els percentatges mensuals a la taula 10).

Figura 54. Cotes dels zeros de referència



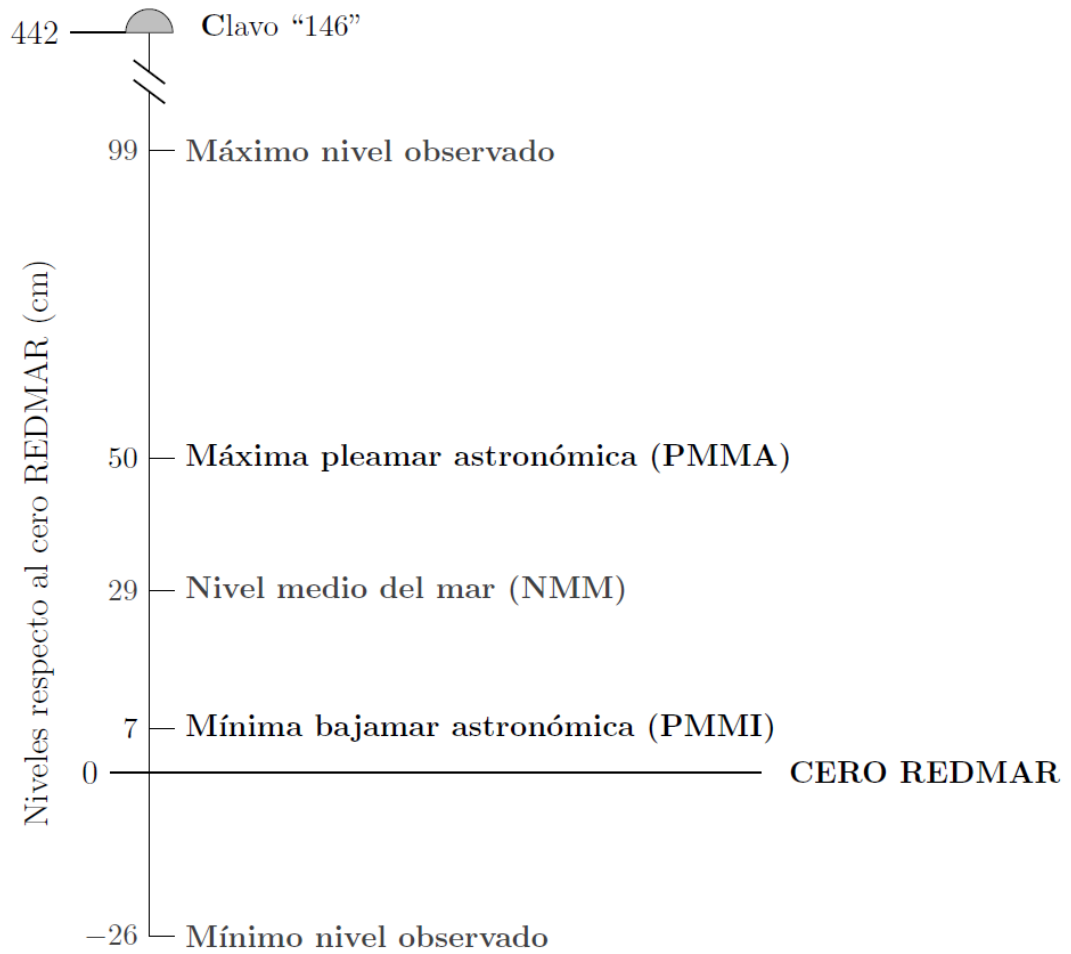
Font: Ports de l'Estat.

Finalment, i a fi d'avaluar unes condicions de llarg termini, s'han considerat els valors del mareògraf de l'Estartit i del mareògraf de Barcelona proporcionades pel Servei Meteorològic de Catalunya, el primer, i per Ports de l'Estat, el segon.

Segons les dades de l'Estartit, s'estableix que l'elevació del nivell del mar durant el període 1990-2016 ha estat de 3,5 cm/decenni (vegeu la figura 56), valor força coincident amb el que apareix al darrer informe de l'IPCC publicat l'any 2021 (per al mateix període, però a escala global).

En canvi, el mareògraf de Barcelona mostra una pujada molt més important, ja que recull una tendència de $5,57 \pm 0,60$ mm/any (vegeu la figura 57).

Figura 55. Nivell del mar a Barcelona



Font: Ports de l'Estat.

Taula 10. Percentatges mensuals del nivell del mar

Los datos horarios de nivel del mar se han obtenido a partir de datos cada 5 minutos, tras filtrar oscilaciones de periodo inferior a 1 hora. Por tanto, estos datos informan de la variación de nivel del mar debida a procesos de baja frecuencia

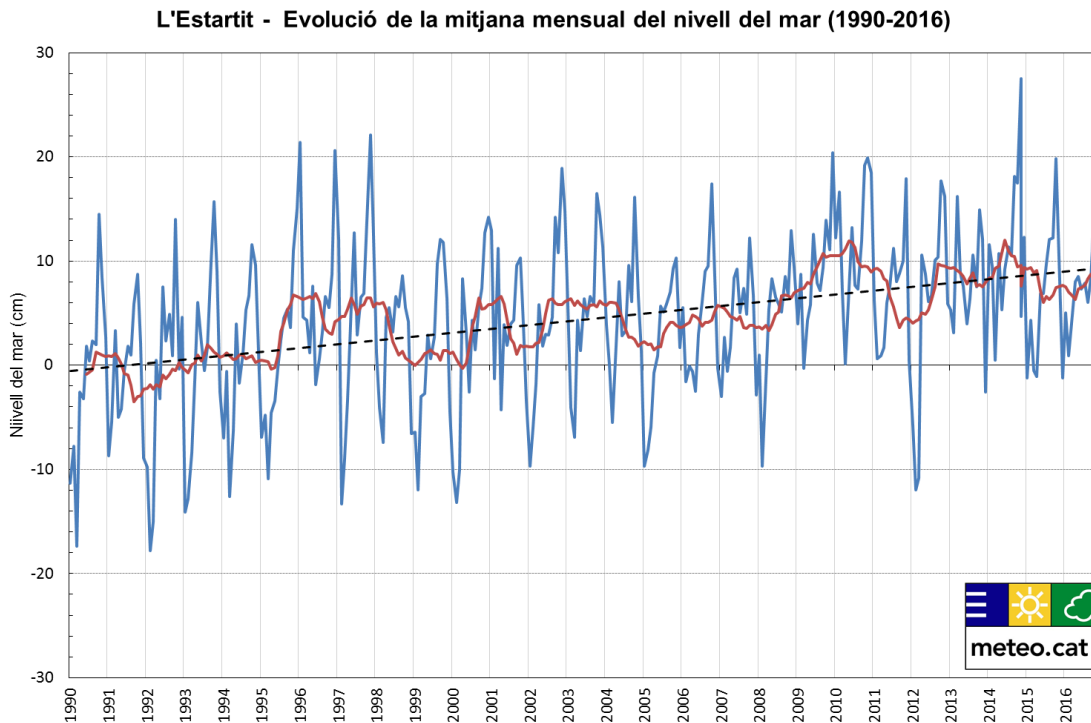
Hourly Data have been calculated using 5-minute Time Series, after filtering oscillations with periods shorter than 1 hour

Mes Month	Nivel Horario /Hourly Level Período: 1994 - 2017 / Period: 1994 - 2017 (cm)											
	-18: -9	-9: 0	0: 9	9: 18	18: 27	27: 36	36: 45	45: 54	54: 63	63: 72	72: 81	81: 90
Ene./Jan	0.03	1.21	8.67	19.08	24.50	23.84	13.70	6.62	1.96	0.39	.00	.00
Feb./Feb.	0.18	2.51	13.42	23.66	26.30	18.86	8.26	4.04	2.10	0.63	0.03	.00
Mar./Mar.	0.05	1.58	10.22	23.72	31.01	20.28	9.01	3.25	0.75	0.10	0.02	.00
Abr./Apr.	.00	0.37	3.94	15.88	31.72	30.37	13.50	3.55	0.50	0.11	0.06	.00
May./May.	.00	.00	1.12	11.80	32.03	34.46	15.57	4.06	0.71	0.16	0.09	.00
Jun./Jun.	.00	.00	0.62	10.54	30.13	36.96	17.96	3.47	0.28	0.03	0.01	.00
Jul./Jul.	.00	.00	0.14	5.60	30.50	42.03	19.16	2.55	0.02	.00	.00	.00
Ago./Aug.	.00	.00	.00	2.02	22.10	46.91	24.92	3.92	0.12	.00	.00	.00
Sep./Sep.	.00	.00	.00	0.66	14.09	41.59	32.48	9.92	1.15	0.07	0.04	.00
Oct./Oct.	.00	.00	.00	1.49	12.11	28.45	32.19	18.48	5.47	1.27	0.44	0.10
Nov./Nov.	.00	0.06	0.45	3.73	15.45	28.69	26.16	16.33	6.88	1.69	0.48	0.08
Dic./Dec.	.00	0.06	2.43	14.77	24.85	26.43	17.02	8.70	3.58	1.56	0.55	0.05
Anual /Annual	0.02	0.48	3.42	11.08	24.56	31.57	19.16	7.07	1.96	0.50	0.14	0.02

Generada por / Generated by Puertos del Estado - Generada el / Generated on 2017/06/27, 10: 6h

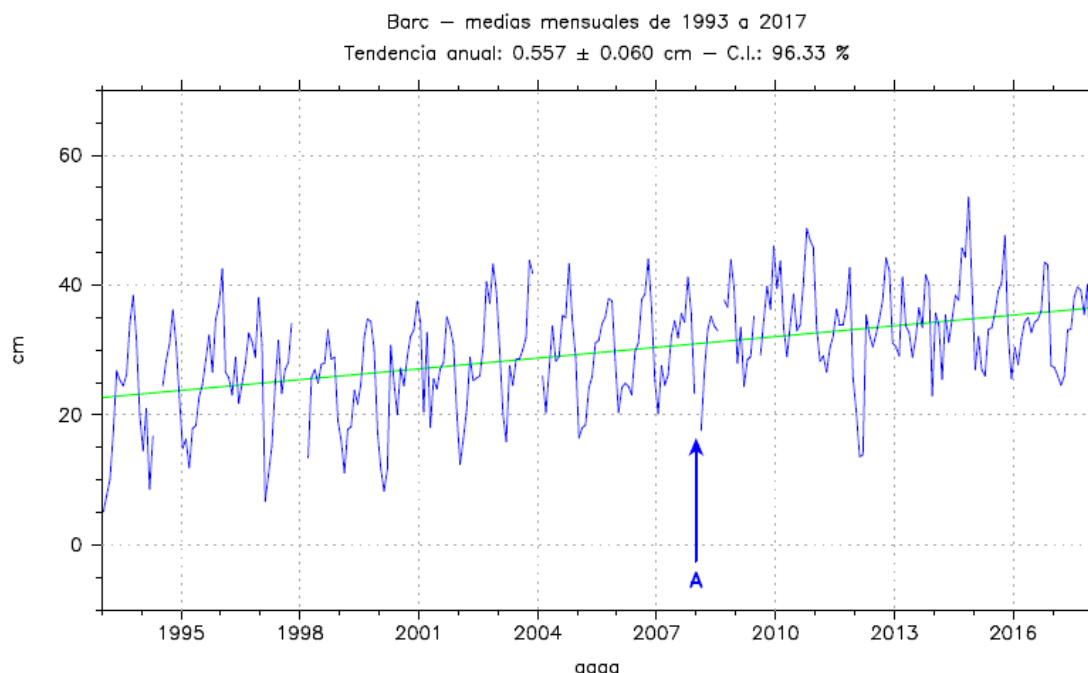
Font: Ports de l'Estat.

Figura 56. Evolució del nivell del mar a l'Estartit per al període 1990-2016



Font: Josep Pascual.

Figura 57. Evolució del nivell del mar a Barcelona per al període 1993-2017



Font: Ports de l'Estat.

2.15.2. Efectes del canvi climàtic en el nivell mitjà

En aquest apartat s'estudia l'efecte que tindrà el canvi climàtic sobre l'ascens del nivell mitjà del mar els anys vinents.

El nivell del mar relatiu o la pujada del nivell mitjà en una determinada zona (dh) abasta la suma dels components global, regional i local del mar. El component global està relacionat amb l'expansió tèrmica de l'aigua i el desglaç, mentre que el regional i el local tenen a veure amb les formes naturals de variabilitat del clima i els moviments verticals de l'escorça terrestre, respectivament.

Tota la informació relativa a la pujada del nivell mitjà del mar ha estat extreta del sisè informe d'avaluació de l'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) elaborat el 2021, *Climate Change 2021. The Physical Science Basis*, i a continuació se n'exposen les conclusions més destacables.

El sisè informe de l'IPCC, del 2021, avalua les simulacions del futur canvi climàtic i abasta horitzons temporals a curt termini (2021-2040), mitjà termini (2041-2060) i llarg termini (2081-2100), i fins a molt llarg termini (any 2300). Les projeccions avaluades es basen principalment en una nova gamma d'escenaris: les vies socioeconòmiques compartides (SSP), utilitzades a la fase sis del projecte d'intercomparació de models acoblats (CMIP6). Entre les SSP, l'atenció se centra en els cinc escenaris principals: SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 i SSP5-8.5.

Comparativa dels escenaris de canvi climàtic

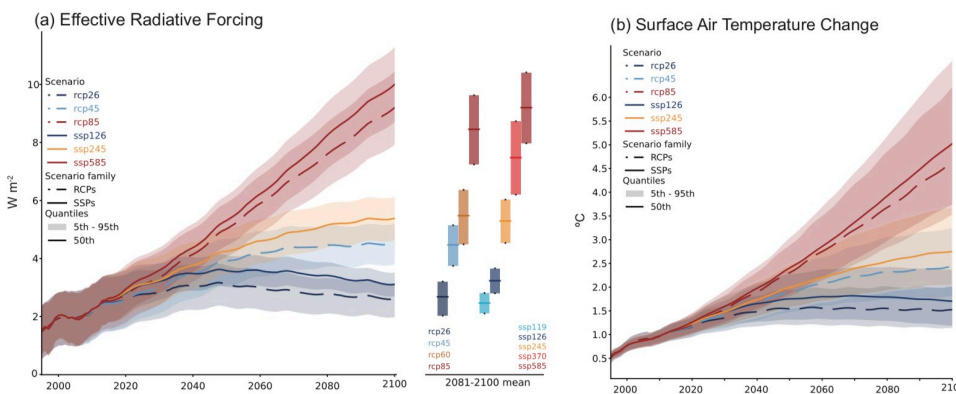
Els escenaris que s'utilitzen al sisè informe del canvi climàtic (IPCC, 2021) no són els mateixos que els que es plantejaven al cinquè informe del canvi climàtic (IPCC, 2013). Això implica que no es pot establir una comparabilitat retroactiva completa entre els dos tipus d'escenaris, ja que les SSP inclouen forçaments regionals, especialment de l'ús de la terra i els aerosols, que són diferents dels RCP presents al cinquè informe.

No obstant això, es pot determinar que aproximadament la meitat de l'augment de l'escalfament al sisè informe del canvi climàtic en comparació del cinquè informe és degut a una sensibilitat climàtica més gran en els models emprats en aquest estudi, a més de la presència de més forçament radiatiu efectiu (de l'anglès *effective radiative forcing* o ERF).

Cal destacar que al cinquè informe es fa servir un període de referència del 1986 al 2005, que s'actualitza al sisè informe a un període de referència del 1995 al 2014. Entre aquests dos períodes, el *global mean sea level* (GMSL) va augmentar 3 cm, i aquesta correcció s'aplica a les projeccions d'informes anteriors, per permetre'n la comparació.

A continuació, es mostra una comparativa dels escenaris utilitzats al cinquè i el sisè informes del canvi climàtic, relatius al forçament radioactiu efectiu i al canvi de la temperatura de l'aire en superfície (vegeu la figura 59). En general, s'observa un acord alt entre les projeccions fins al 2050. A partir d'aquí, l'acord disminueix entre les projeccions, fins a l'any 2100.

Figura 58. Comparativa de les RCP i els SSP simulats



Font: IPCC.

Nivell mitjà del mar global

El nivell mitjà del mar global (GMSL) va augmentar més ràpidament al segle XX que en qualsevol segle anterior durant els últims tres mil·lennis, amb un increment de 0,20 [0,15-0,25] m durant el període 1901-2018. Des de finals del 1960, l'augment del GMSL s'ha accelerat amb una taxa mitjana de 2,3 [1,6-3,1] mm/any durant el període 1971-2018, amb un augment de 3,7 [3,2-4, 2] mm/any durant el període 2006-2018.

L'expansió tèrmica dels oceans (38 %) i la pèrdua de massa de les glaceres (41 %) dominen el canvi total del nivell del mar entre el 1901 i el 2018, mentre que la contribució de Groenlàndia i l'Antàrtida va ser quatre vegades més gran durant el període 2010-2019 que durant el període

1992-1999. El canvi del nivell del mar sorgeix de processos que actuen en una varietat d'escala espacial i temporal, a l'oceà, la criosfera, la Terra sòlida, l'atmosfera i la Terra. Per tant, aquest canvi del nivell del mar és la suma dels canvis en la densitat i la massa de l'oceà com a resultat de canvis en la criosfera o en l'emmagatzematge d'aigua terrestre.

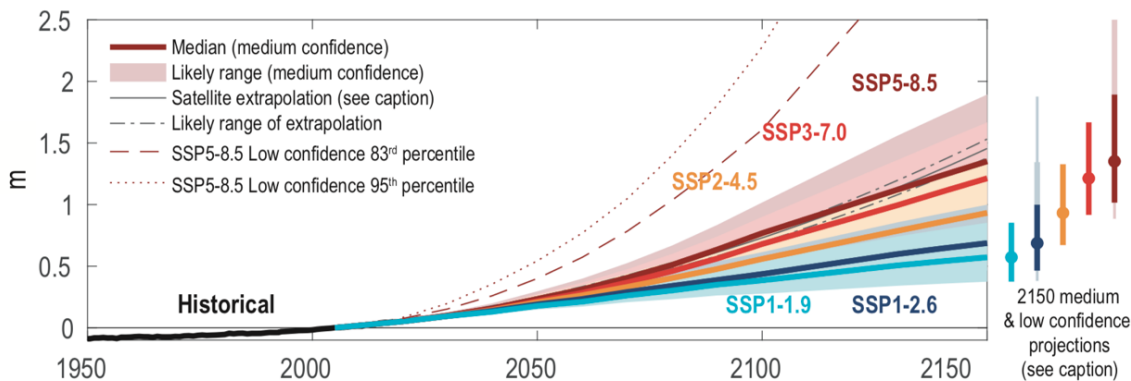
L'IPCC, al sisè informe, proporciona les projeccions de pujada de nivell del mar més fiables per als diferents escenaris d'emissions. En concret, es valoren cinc escenaris: SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 i SSP5-8.5. A la taula 11 i a la figura 59 s'observa que, fins al 2050, les projeccions del GMSL exhibeixen poca dependència de l'escenari amb un augment probable del nivell del mar entre el període de referència (1995-2014) i el 2050 de 0,19 (0,16-0,25) m en l'escenari SSP1-2,6 i de 0,23 (0,20-0,30) m en l'escenari SSP5-8,5. Més enllà del 2050, els escenaris divergeixen cada vegada més. Entre el període de referència (1995-2014) i el 2100, els processos en la projecció en què hi ha una confiança mitjana impulsen un augment probable del GMSL de 0,44 (0,32-0,62) m i de 0,77 (0,63-1,01) m en els escenaris SSP1-2,6 i SSP5-8,5, respectivament.

Taula 11. Valors de pujada del nivell mitjà per diferents escenaris

	SSP1-1.9	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5	SSP5-8.5 <i>Low Confidence</i>
Thermal expansion	0.12 (0.09–0.15)	0.14 (0.11–0.18)	0.20 (0.16–0.24)	0.25 (0.21–0.30)	0.30 (0.24–0.36)	0.30 (0.24–0.36)
Greenland	0.05 (0.00–0.09)	0.06 (0.01–0.10)	0.08 (0.04–0.13)	0.11 (0.07–0.16)	0.13 (0.09–0.18)	0.18 (0.09–0.59)
Antarctica	0.10 (0.03–0.25)	0.11 (0.03–0.27)	0.11 (0.03–0.29)	0.11 (0.03–0.31)	0.12 (0.03–0.34)	0.19 (0.02–0.56)
Glaciers	0.08 (0.06–0.10)	0.09 (0.07–0.11)	0.12 (0.10–0.15)	0.16 (0.13–0.18)	0.18 (0.15–0.21)	0.17 (0.11–0.21)
Land-water Storage	0.03 (0.01–0.04)	0.03 (0.01–0.04)	0.03 (0.01–0.04)	0.03 (0.02–0.04)	0.03 (0.01–0.04)	0.03 (0.01–0.04)
Total (2030)	0.09 (0.08–0.12)	0.09 (0.08–0.12)	0.09 (0.08–0.12)	0.10 (0.08–0.12)	0.10 (0.09–0.12)	0.10 (0.09–0.15)
Total (2050)	0.18 (0.15–0.23)	0.19 (0.16–0.25)	0.20 (0.17–0.26)	0.22 (0.18–0.27)	0.23 (0.20–0.29)	0.24 (0.20–0.40)
Total (2090)	0.35 (0.26–0.49)	0.39 (0.30–0.54)	0.48 (0.38–0.65)	0.56 (0.46–0.74)	0.63 (0.52–0.83)	0.71 (0.52–1.30)
Total (2100)	0.38 (0.28–0.55)	0.44 (0.32–0.62)	0.56 (0.44–0.76)	0.68 (0.55–0.90)	0.77 (0.63–1.01)	0.88 (0.63–1.60)
Total (2150)	0.57 (0.37–0.86)	0.68 (0.46–0.99)	0.92 (0.66–1.33)	1.19 (0.89–1.65)	1.32 (0.98–1.88)	1.98 (0.98–4.82)
Rate (2040–2060)	4.1 (2.8–6.0)	4.8 (3.5–6.8)	5.8 (4.4–8.0)	6.4 (5.0–8.7)	7.2 (5.6–9.7)	7.9 (5.6–16.1)
Rate (2080–2100)	4.2 (2.4–6.6)	5.2 (3.2–8.0)	7.7 (5.2–11.6)	10.4 (7.4–14.8)	12.1 (8.6–17.6)	15.8 (8.6–30.1)

Font: IPCC.

Figura 59. Pujada del nivell mitjà del mar segons els diferents escenaris



Font: IPCC.

Nivell mitjà del mar regional: costa mediterrània espanyola

Pel que fa a la conca, les diferències regionals en el nivell del mar sorgeixen de la dinàmica oceànica; dels canvis en la gravetat, la rotació i la deformació de la Terra pel gel terrestre, i dels canvis a l'aigua terrestre, així com del moviment vertical de la terra.

En general, el càlcul dels canvis regionals del nivell del mar es resol mitjançant observacions de mareògrafs i altimetria satel·lital.

Per a l'oceà Atlàntic, el sisè informe del canvi climàtic va descriure la variabilitat regional del nivell del mar impulsada principalment per les variacions del flux de vent i la calor associades amb l'oscil·lació de l'Atlàntic nord (NAO) i els canvis en el transport de calor relacionats amb la variabilitat de la circulació de retorn meridional de l'Atlàntic (AMOC).

Tot i això, la resolució continua sent un factor, ja que la majoria dels models emprats en el sisè informe del canvi climàtic són lluny de les resolucions que representen directament els processos costaners i regionals d'aigües poc profundes.

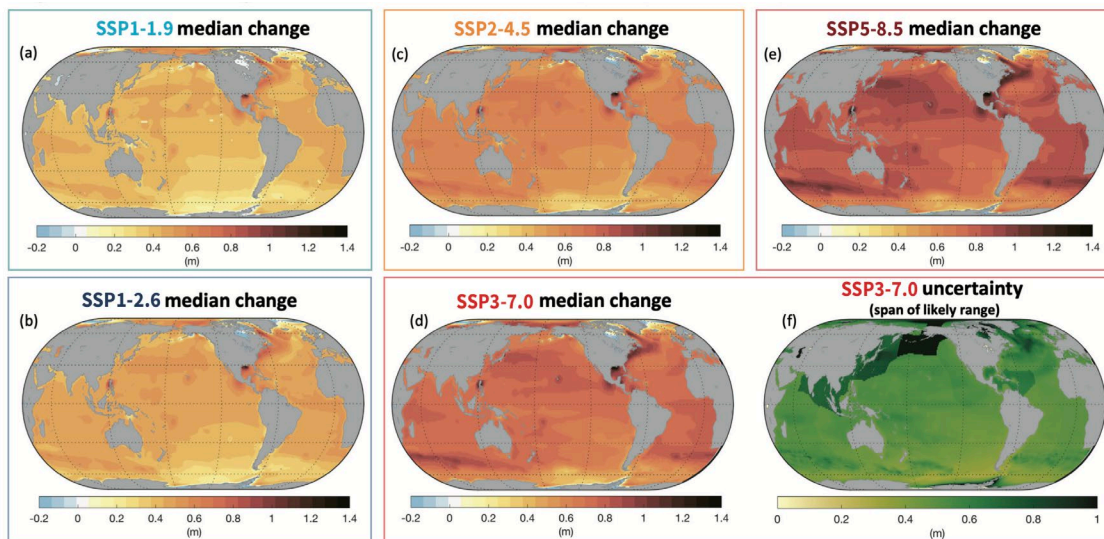
A escala regional, a Espanya s'han fet diversos estudis sobre l'augment del nivell del mar a la costa, i s'han obtingut índexs de creixement d'entre 2 i 3 mm/any durant l'últim segle, amb variacions importants a la conca mediterrània per efectes regionals.

Concretament, mentre que a escala global durant el segle XX es va produir un augment del nivell del mar, la Mediterrània va patir un descens de nivell a partir del 1960 i, a partir del 1993, es va produir un canvi de tendència, en què es va detectar un increment notable de la velocitat a què s'eleva el nivell del mar, coincidint amb el que es va observar a la resta del món.

A Catalunya, tal com s'ha comentat més amunt, s'han determinat els valors de pujada del nivell mitjà del mar analitzant les dades dels dos mareògrafs amb registres més amplis, com són el de l'Estartit (Servei Meteorològic de Catalunya) i el de Barcelona (REDMAR, Ports de l'Estat). A l'Estartit, aquest increment s'ha xifrat en valors compresos entre 2,4 i 8,7 mm/any, mentre que en el cas de Barcelona s'observa un increment sobre els valors mitjans mensuals de $5,57 \pm 0,60$ mm/any.

Pel que fa a les projeccions, la informació regional disponible continua sent limitada. A continuació es mostren els resultats regionals de les variacions al nivell del mar respecte al període 1995-2014, per als cinc escenaris analitzats a l'IPCC (vegeu la figura 60).

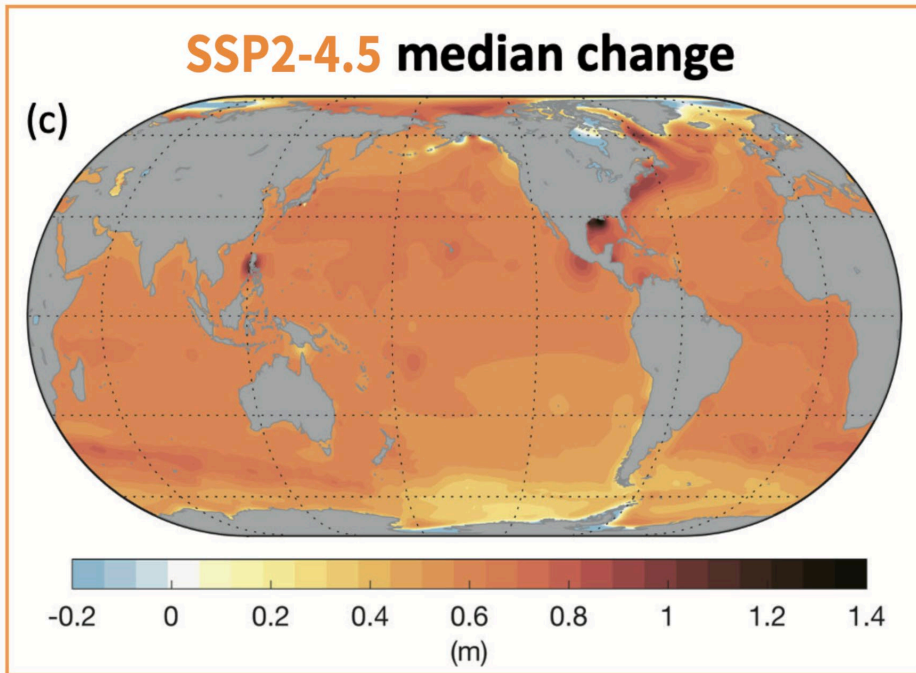
Figura 60. Canvis regionals del nivell mitjà del mar el 2100



Font: IPCC.

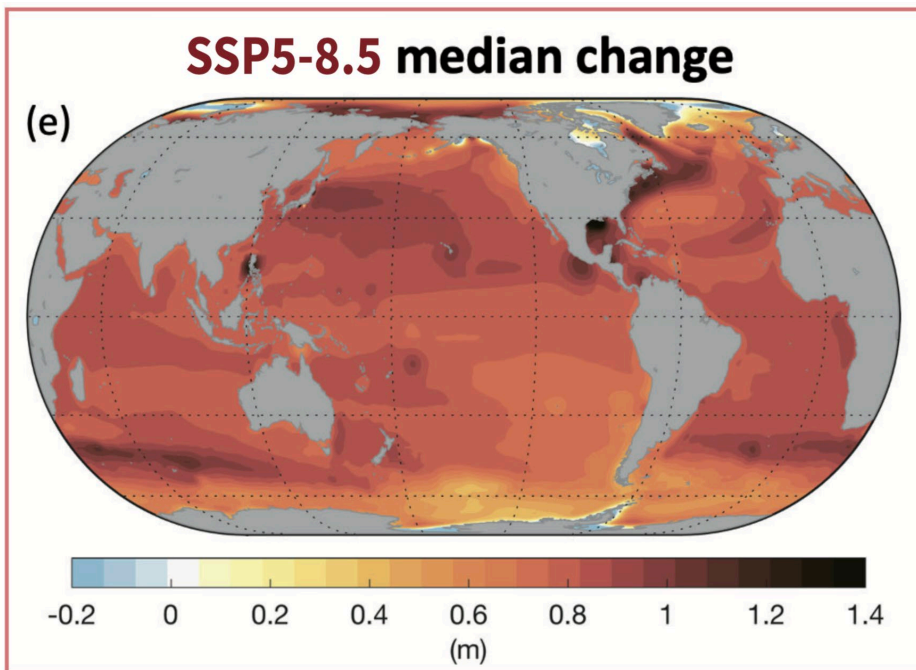
Si es fa un zoom als escenaris SSP2-4.5 (vegeu la figura 61) i SSP5-8.5 (vegeu la figura 62), s'observa que a la costa mediterrània espanyola per a l'horitzó 2100 s'esperen augments del nivell del mar entorn de 0,6 m i 0,8 m, respectivament, fet que suposa ser dins de la mitjana global (que és de 0,56 m i 0,77 m, respectivament).

Figura 61. Canvis regionals del nivell mitjà del mar el 2100 per a l'escenari SSP2-4.5



Font: IPCC.

Figura 62. Canvis regionals del nivell mitjà del mar el 2100 per a l'escenari SSP5-8.5



Font: IPCC.

Nivell mitjà del mar local

Per obtenir la pujada del nivell del mar local a les costes espanyoles, cal sumar, al valor regionalitzat, els moviments verticals de l'escorça terrestre associats a la subsidència. Aquest fenomen és especialment important en desembocadures de rius, on es produeixen aportacions de sediments. A Espanya, són especialment destacables el delta de l'Ebre i la zona de la desembocadura del Guadalquivir. En el cas del Maresme, aquest factor no té cap incidència significativa, de manera que, per a futures projeccions, es mantenen els anteriors valors mitjans del mar regionalitzats per a la costa mediterrània.

Per acabar, i d'acord amb altres estudis fets a l'àrea de Barcelona, es recomana considerar dos possibles escenaris per definir els valors de pujada de nivell mitjà per efecte del canvi climàtic: l'SSP2-4.5 i l'SSP5-8.5.

A tall informatiu, analitzant les dades per a l'horitzó 2054 i l'horitzó 2084 (situacions hipotètiques d'aquí a 30 i 60 anys, respectivament), els valors de pujada de nivell del mar establerts segons aquests escenaris es mostren a la taula 12.

Taula 12. Valors de pujada del nivell mitjà per a diferents escenaris futurs

Escenari		2054	2084
SSP2-4.5	Est. centr.	0,226	0,433
	Banda 90 %	0,305	0,595
SSP5-8.5	Est. centr.	0,255	0,545
	Banda 90 %	0,327	0,721

Font: elaboració pròpia.

3. PROPAGACIONS DE L'ONATGE

Un cop analitzat el clima marítim, s'han aproximat les dades a la costa per mitjà de la propagació de l'onatge. En aquest primer apartat es mostren les simulacions numèriques fetes per caracteritzar el règim de l'onatge local.

3.1. Característiques numèriques

Per a l'estudi de propagacions exteriors s'ha emprat el model SWAN, desenvolupat per la Universitat de Delft. El model SWAN (*simulating waves nearshore*) és un model de propagació d'onatge de tercera generació que permet obtenir estimacions realistes de paràmetres de l'onatge en àrees costaneres, llacs i estuaris a partir de condicions donades de vent, batimetria i corrents.

El model SWAN resol la propagació d'onatge espectral en temps i espai, i és capaç de reproduir els fenòmens de *shoaling*, refracció, variació en la freqüència a causa de corrents i profunditat no estacionària, generació d'onatge per vent, interacció ona-ona, fricció amb el fons, trencament d'onatge, *set-up* induït per onatge, transmissió i reflexió degudes a obstacles, i difracció.

Els models numèrics es basen en informació digitalitzada de batimetria i línia de costa, de manera que, en primer lloc, cal dur a terme un MDT (modelatge digital del terreny) d'acord amb la informació disponible de la zona. Les dades de batimetria s'han extret d'una batimetria de detall a la zona d'estudi i es completen amb les dades de la carta nàutica número 48C, «Del cap de Tortosa al cap de Tossa» (vegeu la figura 63), i la carta número 489 «De Barcelona a Arenys de Mar» (vegeu la figura 64), totes dues de l'Institut Hidrogràfic de la Marina (IHM).

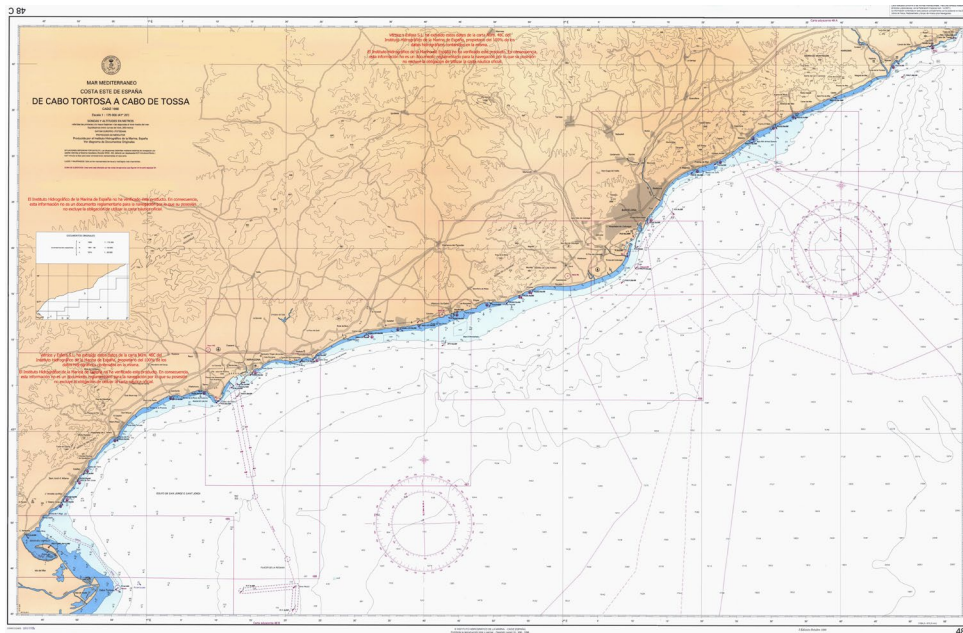
D'aquesta manera, es genera el domini computacional i la batimetria general utilitzats en les propagacions. Per a tots els sectors s'ha fet servir una mateixa malla, que parteix d'aigües relativament fondes i inclou la ubicació de la boia de Barcelona i el node SIMAR de vent. Aquesta malla té unes dimensions de 46 × 40 km, amb cel·les quadrades de 100 m de costat, cosa que implica 461 × 401 nodes (vegeu la figura 65).

Per apropar la informació de la boia fins a les proximitats de la costa, cal aplicar un procés de *downscaling* (reducció d'escala) cap a la zona d'interès. Per fer-ho, existeixen tècniques com el *downscaling* estadístic o el *downscaling* dinàmic, que per mitjà de transformacions directes, en el primer cas, o propagacions de tots els estats del mar d'un registre, en el segon, permeten dur a terme aquest procés d'aproximació. Atès que la primera metodologia és menys precisa i la segona té un cost computacional elevat, a vegades s'empren metodologies mixtes, com ara el *downscaling* híbrid. Segons aquesta metodologia, es fan un conjunt limitat de propagacions, anomenades *clústers*, que permeten definir els valors de transformació de l'onatge entre la font de dades, l'inici de la malla i la zona d'interès a prop de la costa per a aquest conjunt limitat d'estats del mar.

A partir dels resultats de la propagació dels casos seleccionats pel mètode del *downscaling* híbrid, i mitjançant tècniques multivariables d'interpolació, és possible transformar un registre

complet des d'aigües profundes i definir per a cada estat del mar del registre els valors més adequats de transformació de l'onatge, que bàsicament són el coeficient de propagació, o K_p , i l'angle de gir en la direcció de propagació. Aquesta metodologia s'ha emprat per a la propagació completa del registre.

Figura 63. Carta nàutica 48C



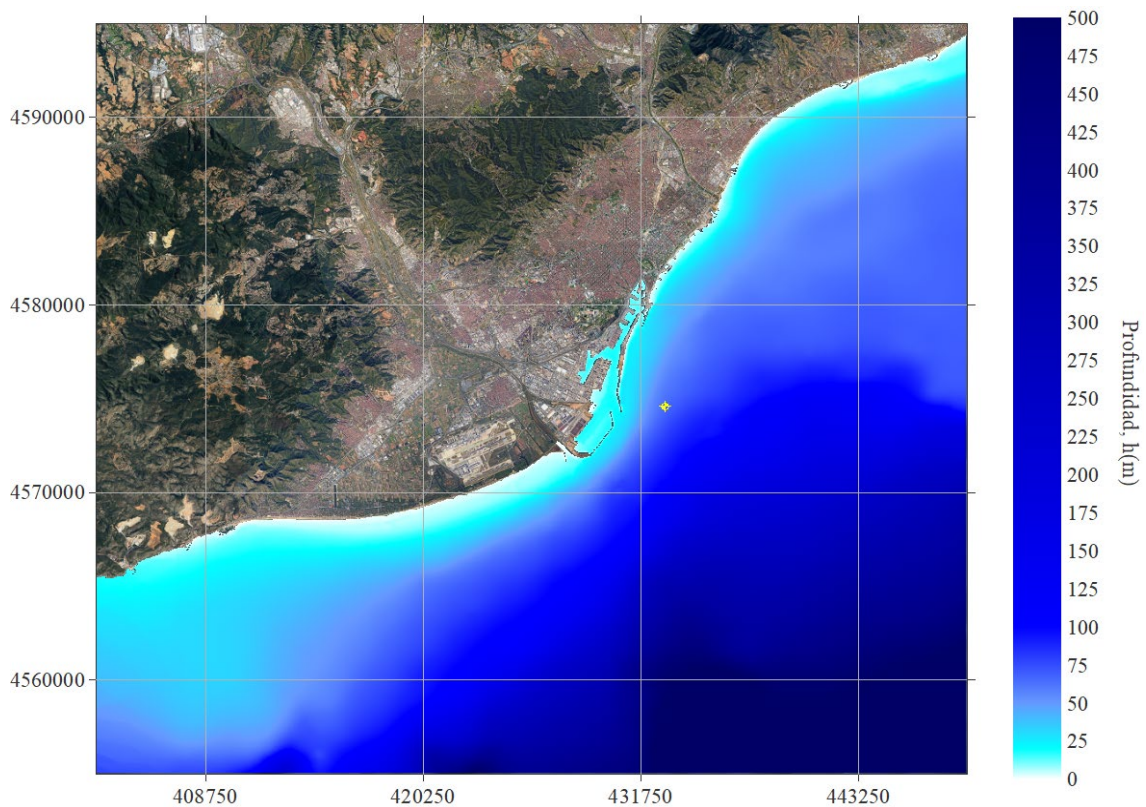
Font: IHM.

Figura 64. Carta nàutica 489



Font: IHM.

Figura 65. Domini i batimetria de la malla de propagació



Font: elaboració pròpia.

3.2. Propagacions de l'onatge

En aquest apartat es mostren les simulacions numèriques fetes per caracteritzar el règim d'onatge, que correspon als onatges propagats des de la boia. Pel que fa al règim mitjà, se seleccionen els casos d'estats del mar, després d'aplicar l'algoritme de màxima dissimilitud (MaxDiss). En concret, s'han seleccionat 927 casos, o clústers, que es consideren prou representatius del conjunt de dades de la sèrie històrica.

L'algoritme selecciona una primera dada en un extrem del núvol de punts tridimensional format per les variables alçària d'onada (H_s), període de pic (T_p) i direcció mitjana de l'onatge (θ), i a continuació tria la dada que es troba més allunyada d'aquest primer punt, és a dir, selecciona dades entre les quals hi ha la màxima dissimilitud.

Aquesta operació es repeteix tantes vegades com casos o clústers es vulguin emprar en les propagacions. La selecció de les dades de vent es fa identificant els estats del mar de la sèrie d'onatge, assignant en cada cas els valors de velocitat i direcció del vent associats a l'instant de tota la sèrie històrica en què es produeix el registre d'onatge corresponent. La llista dels 927 casos seleccionats es recull a l'annex 1.

El conjunt de casos anterior s'empra per transformar tot el registre complet de dades, des de la ubicació de la boia fins a la costa, per mitjà de tècniques d'interpolació (*downscaling* híbrid). Les figures amb la distribució en planta de l'alçària d'onada propagades en condicions mitjanes en tot el domini de propagació per a 30 dels 927 casos simulats es poden veure a l'annex 2, i la llista dels 30 casos d'exemple seleccionats d'entre els 927 casos simulats es mostra a la taula 13.

En general, es pot observar que els onatges amb un període més gran noten el fons abans, és a dir, comencen a refractar abans. Això provoca que els onatges amb períodes grans arribin més perpendiculars a les batimètriques a prop de la costa. Segons el que s'aprecia a l'annex 2, els onatges que més varien la direcció d'incidència són els més oblics respecte a les batimètriques, sobretot els de període gran.

Taula 13. Llista dels 30 casos d'exemple d'entre els 927 clústers

Nom	H_s (m)	T_p (s)	Dir (°)	W_s (m/s)	DirW (°)	T (m)
C011005	0,33	9,21	91,2	2,91	283,16	0,3
C011210	0,34	11,24	189,86	3,26	203,56	0,42
C021907	0,48	18,13	126,8	3,46	187,99	0,35
C022518	0,48	24,96	348	4,67	154	0,4
C030312	0,92	2,62	233	11,91	297	0,32
C032303	0,82	22,36	47	5,44	197	0,3

C032507	0,98	24,96	132	4,21	101	0,35
C041002	1,24	9,07	31	6	354	0,36
C041910	1,28	18,11	198	9,3	243	0,45
C050711	1,74	6,67	204,99	9,11	249,12	0,46
C051205	1,75	11,1	87,4	1,75	76,44	0,32
C060603	2,19	5,79	53,55	9,7	59,38	0,44
C061011	2,1	9,08	213,88	10,31	273,44	0,51
C061206	2,37	11,09	103	4,29	81	0,5
C070908	2,6	8,47	147,03	8,94	219,18	0,52
C071205	2,6	11,09	90,96	8,04	259,92	0,57
C081010	2,87	9,05	193,51	9,25	260,57	0,64
C081206	3,11	11,09	105	1	298	0,55
C090811	3,27	7,67	205,32	16,8	239,17	0,54
C091205	3,28	11,09	98	3,31	201	0,54
C100910	3,72	8,33	193,4	13,22	218,06	0,56
C101105	3,81	10,49	89,38	9,5	6,13	0,45
C110905	4,2	8,9	93,58	16,07	48,73	0,39
C111205	4,18	11,08	92,32	11,18	310,87	0,52
C121006	4,46	9,61	104,03	16,41	50,05	0,29
C121205	4,71	11,09	91	14,1	316	0,46
C131005	5,04	9,92	97,5	16,09	57,13	0,33
C131106	4,95	10,11	102,95	17,13	35,96	0,33
C141005	5,35	9,67	95	15,34	96	0,31

C141106	5,21	10,62	104	17,51	32	0,37
---------	------	-------	-----	-------	----	------

Font: elaboració pròpia.

4. RESULTATS DE L'ONATGE LOCAL

En aquest apartat es resumeixen els resultats de les propagacions, que determinaran els onatges resultants locals en règim mitjà. S'han obtingut resultats locals en tres punts a prop de la costa.

Després de les propagacions, es reconstrueix la sèrie completa de les dades de la boia a partir de les dades de la selecció als punts on interessa obtenir l'anàlisi del règim mitjà a escala local.

Per reconstruir la sèrie, s'utilitza l'algorisme RBF (funció de base radial o *radial basis function*, per les sigles en anglès). Aquest algorisme és una xarxa neuronal artificial de base radial que permet interpolat resultats en funció de la distància a un punt específic anomenat *centre*, per a cadascuna de les variables que es reconstrueixen i per a cadascun dels punts on es volen obtenir resultats.

Després de fer la transformació de tot el registre de dades de la boia, s'ha obtingut un registre de dades complet en tres punts: un punt a prop de Badalona (B), representatiu dels municipis del nord metropolità; un altre a prop de Gavà i Castelldefels (G-C), i un últim a prop del Prat i Viladecans (P-V). A la figura 66 es mostren les localitzacions dels tres punts, i a la taula 14, les coordenades.

Figura 66. Localitzacions dels punts



Font: elaboració pròpia.

Taula 14. Coordenades dels punts resultants

	X (UTM)	Y (UTM)
B	437.262,50	4.587,882,50
G-C	41.929,03	4.567.881,20
P-V	422.819,08	4.569.203,48

Font: elaboració pròpia.

4.1. Punt de Badalona. Municipis del nord

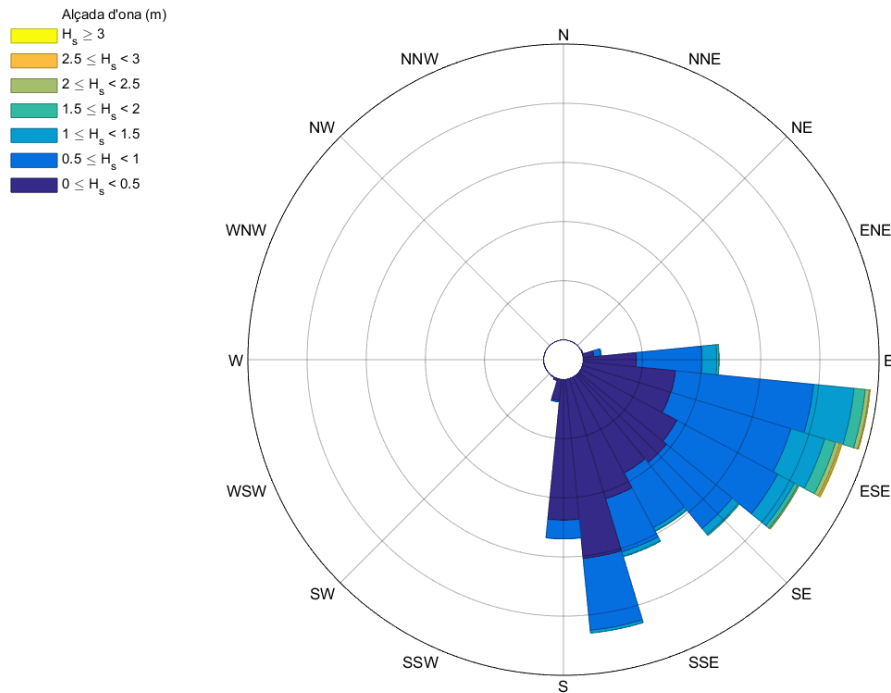
A la figura 67 i a la taula 15 es mostren els resultats per al punt B. Tal com s'aprecia, els onatges que arriben a la costa provenen principalment del segon quadrant, ja que són els més freqüents i energètics.

Taula 15. Taula H_s-direcció del punt B

Sector/Hs	<=0.5	0.5-1.0	1.0-1.5	1.5-2.0	2.0-2.5	2.5-3.0	3.0-3.5	>=3.5	%	TOTAL
N	3	0	0	0	0	0	0	0	0	3
NNE	5	0	0	0	0	0	0	0	0	5
NE	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2
ENE	199	19	0	0	0	0	0	0	0.14	218
E	8783	10862	2722	553	129	24	5	0	14.95	23078
ESE	16502	20756	5226	1599	623	182	51	11	29.11	44950
SE	16168	11489	1155	201	28	8	1	0	18.81	29050
SSE	22423	9557	634	65	14	0	0	0	21.17	32693
S	19952	3733	46	0	0	0	0	0	15.37	23731
SSW	581	6	0	0	0	0	0	0	0.38	587
SW	25	0	0	0	0	0	0	0	0.02	25
WSW	33	0	0	0	0	0	0	0	0.02	33
W	14	0	0	0	0	0	0	0	0.01	14
WNW	5	0	0	0	0	0	0	0	0	5
NW	9	0	0	0	0	0	0	0	0.01	9
NNW	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2
%	54.86	36.54	6.34	1.57	0.51	0.14	0.04	0.01	100	
TOTAL	84706	56422	9783	2418	794	214	57	11		154405

Font: elaboració pròpia.

Figura 67. Rosa d'onatge del punt B



Font: elaboració pròpia.

Els ajustos de les tendències al node de Badalona s'han fet per als cinc sectors més representatius: l'E, l'ESE, el SE, el SSE i el S. A partir dels llindars del mètode POT, s'obté una mostra d'extremes per a cada sector i el nombre de tempestes a l'any. Tots aquests valors es resumeixen a la taula 16.

Taula 16. Paràmetres de l'ajust extremal del punt B pel mètode POT

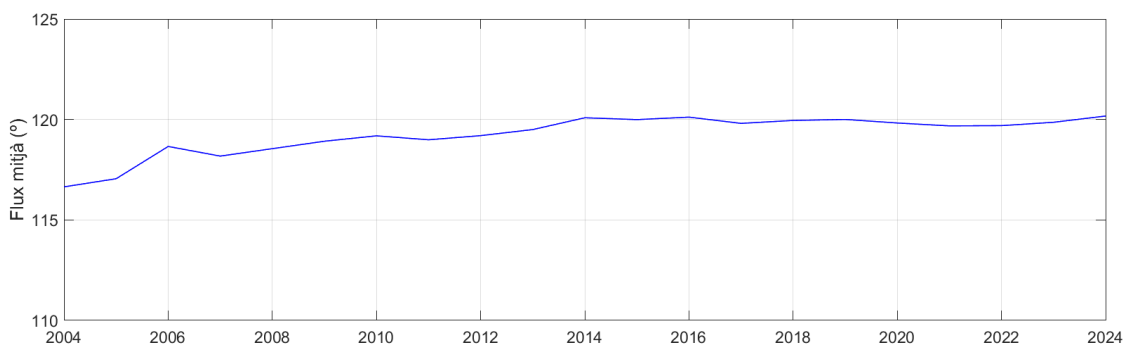
Sector	H_s POT	Nre. temp.
E	1,70	94
ESE	1,90	89
SE	1,30	120
SSE	1,15	103
S	0,85	101

Font: elaboració pròpia.

4.1.1. Tendències del flux mitjà

Tal com s'ha fet amb les dades de la boia, a la figura 68 es mostra l'evolució del flux energètic mitjà al llarg dels anys.

Figura 68. Evolució del flux energètic mitjà a Badalona



Font: elaboració pròpia.

A la gràfica es poden observar les fluctuacions pròpies dels primers anys per la falta de dades acumulades. Des de l'any 2009 fins al 2013, es pot veure clarament un flux amb una tendència clara a virar cap al sud, però es pot establir que en l'última dècada això canvia i el flux mitjà s'estabilitza entorn dels 120°. Això vol dir que l'energia, de manera mitjana, s'ha estat desplaçant des de les direccions de llevant cap al sud, però en els darrers anys sembla que es manté estable.

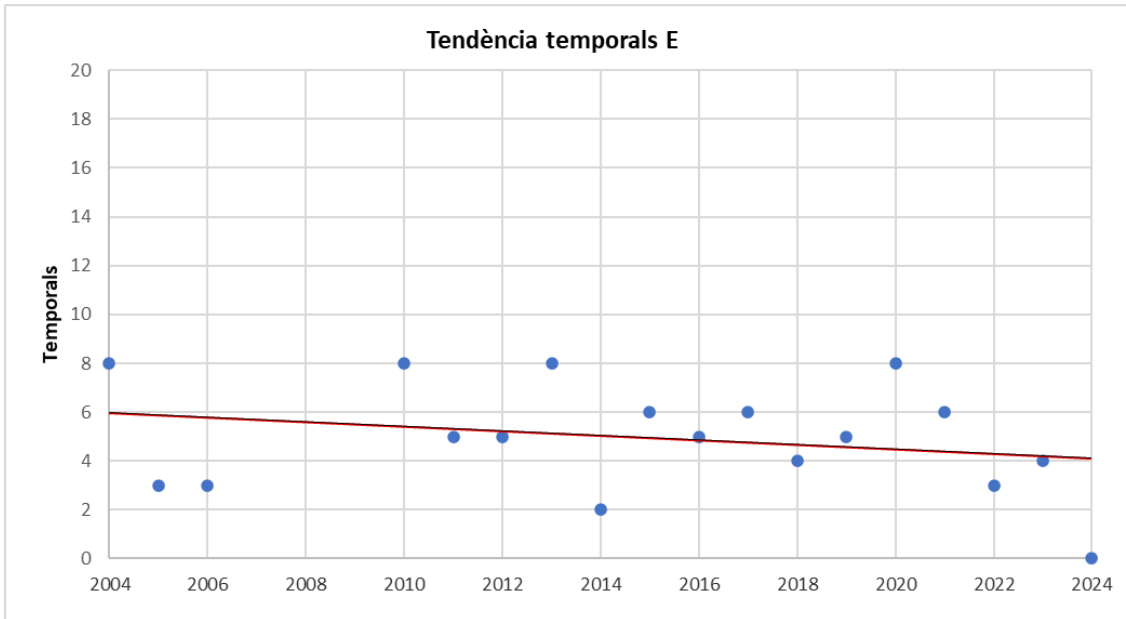
4.1.2. Tendències del nombre de temporals

La distribució sectorial de l'onatge permet calcular els temporals en cada sector que s'hagi seleccionat prèviament. En aquest cas, l'anàlisi extremal dels sectors més energètics s'ha fet a partir de l'obtenció d'una mostra d'extremes representativa, seleccionant els temporals pel mètode del llindar o POT (*peak over threshold*), que permet definir els pics dels temporals independents entre si.

Atenent la capacitat energètica dels diferents onatges, s'analitzen, d'una banda, els que presenten temporals de llevant (els més energètics) i, de l'altra, els temporals del sud, de manera que queda comprès del sector E al sector S. Els resultats d'aquestes tendències es mostren a les figures 69-73 per a les dades propagades fins al punt de Badalona.

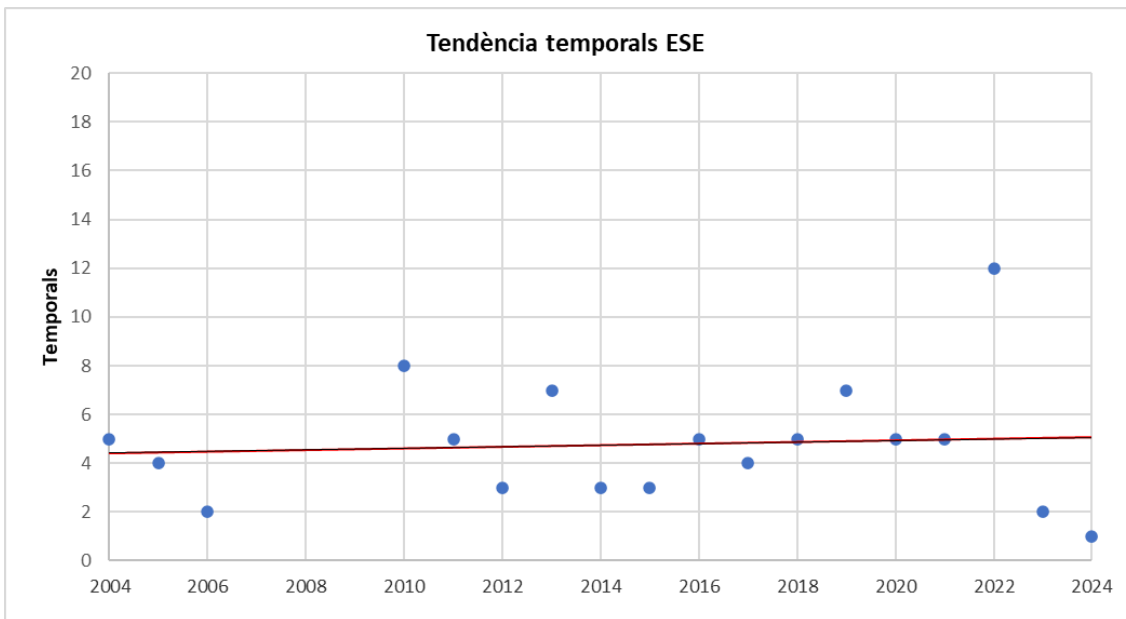
Es pot observar que per als sectors de llevant, l'E, l'ESE i el SE, les tendències són decreixents (tret de l'ESE), és a dir, el nombre de temporals per any al llarg dels divuit anys considerats ha disminuït. En canvi, als sectors amb component sud, hi ha unes tendències creixents que impliquen un augment important en el nombre de temporals al llarg dels anys.

Figura 69. Tendència del nombre de temporals del sector E



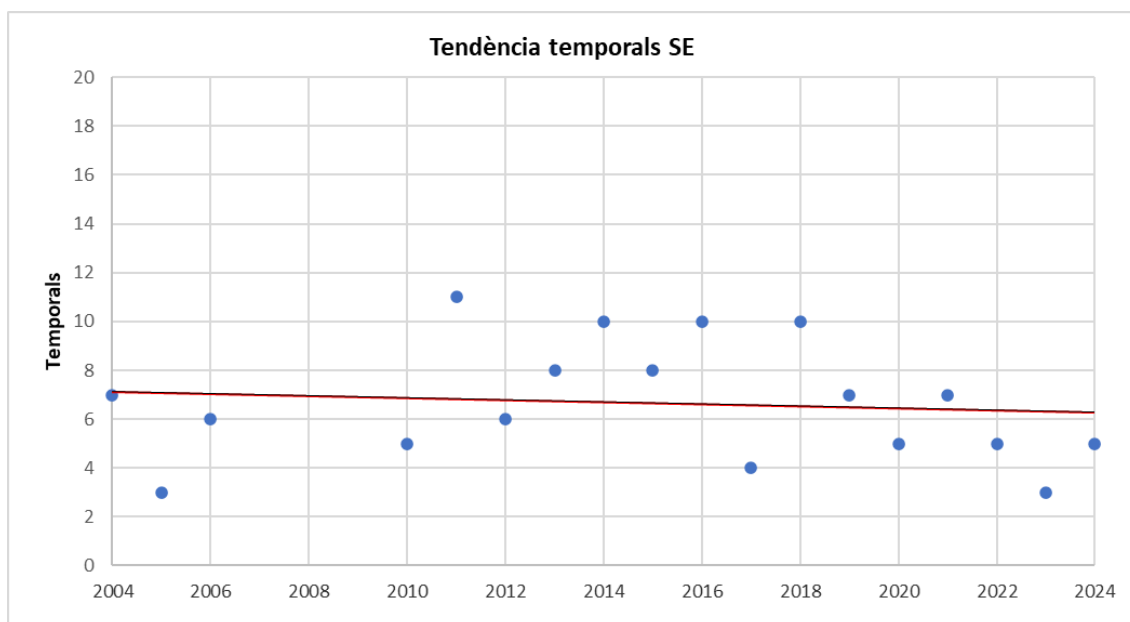
Font: elaboració pròpia.

Figura 70. Tendència del nombre de temporals del sector ESE



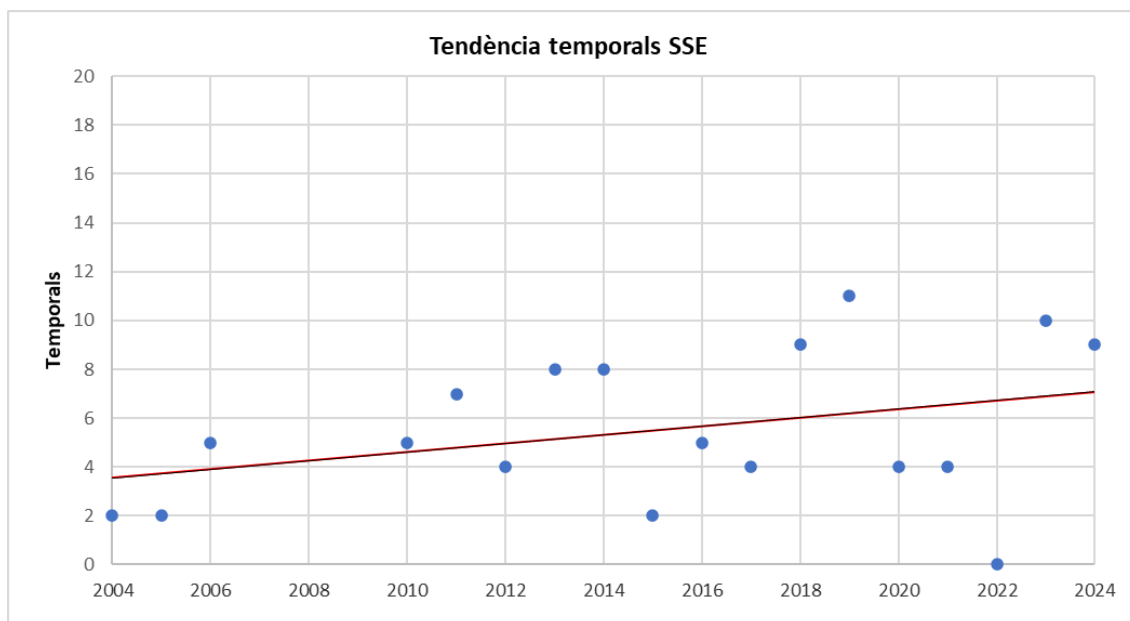
Font: elaboració pròpia.

Figura 71. Tendència del nombre de temporals del sector SE



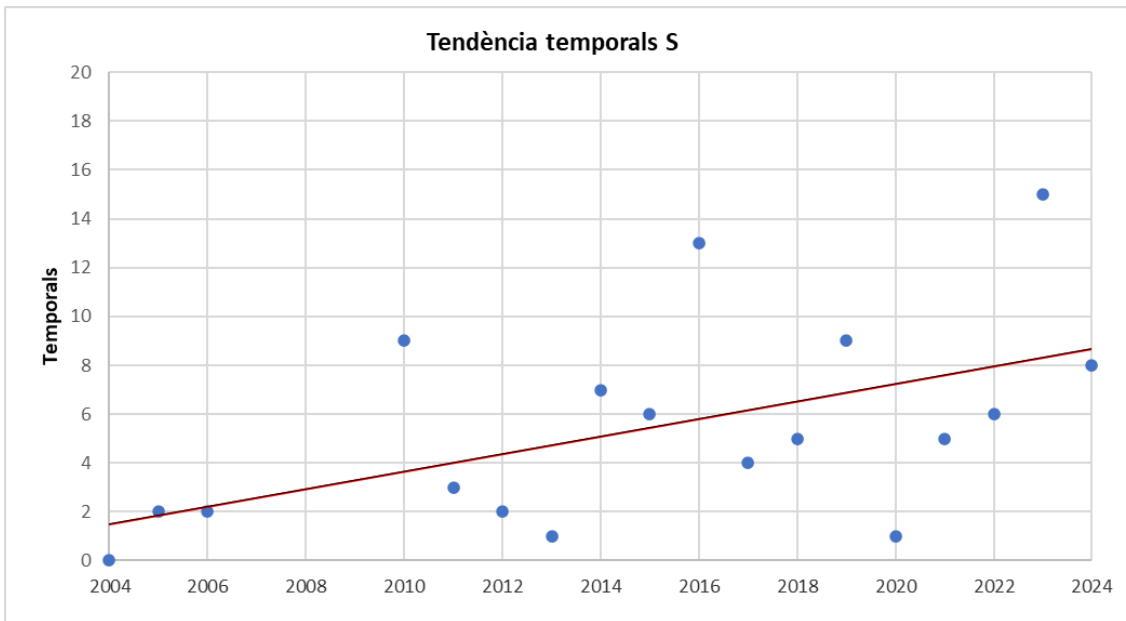
Font: elaboració pròpia.

Figura 72. Tendència del nombre de temporals del sector SSE



Font: elaboració pròpia.

Figura 73. Tendència del nombre de temporals del sector S



Font: elaboració pròpia.

A la taula 17 es mostren les ràtios d'aquestes tendències en increment de temporals per any i sector.

Taula 17. Ràtio de l'augment de temporals per any

	Ràtio de temporals
E	-0,09
ESE	0,03
SE	-0,04
SSE	0,18
S	0,36

Font: elaboració pròpia.

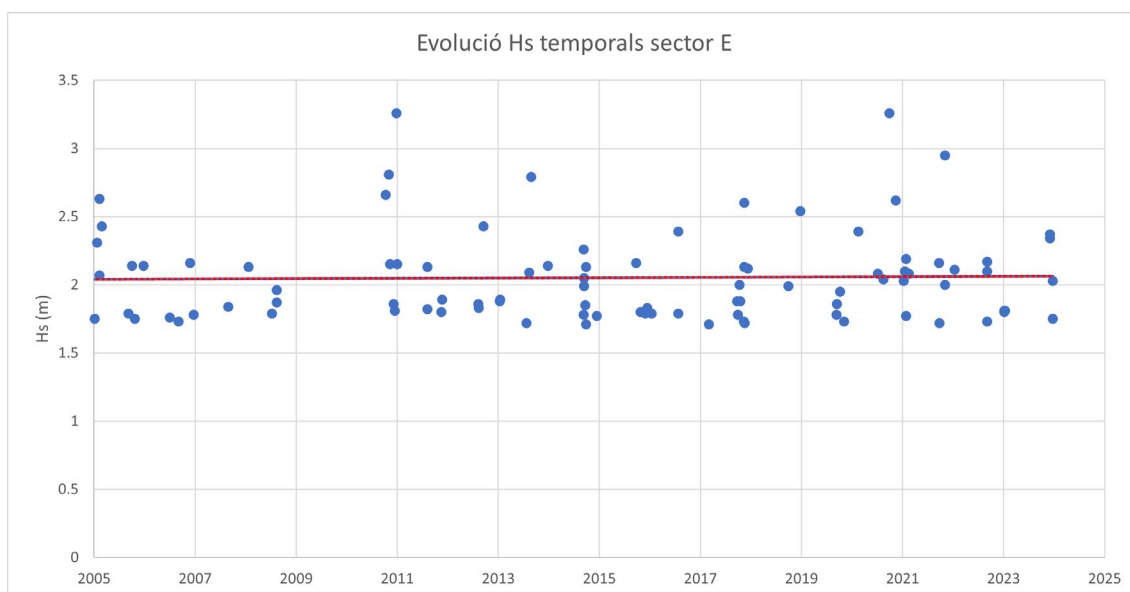
Com es pot veure, es confirma que la freqüència del nombre de temporals de llevant es redueix, mentre que la dels temporals de garbí augmenta.

4.1.3. Tendències de l'alçària d'onada

Per estudiar l'alçària d'onada es consideren novament tots els temporals sense eliminar cap any, és a dir, en aquest cas també s'inclouen els anys 2007 i 2009.

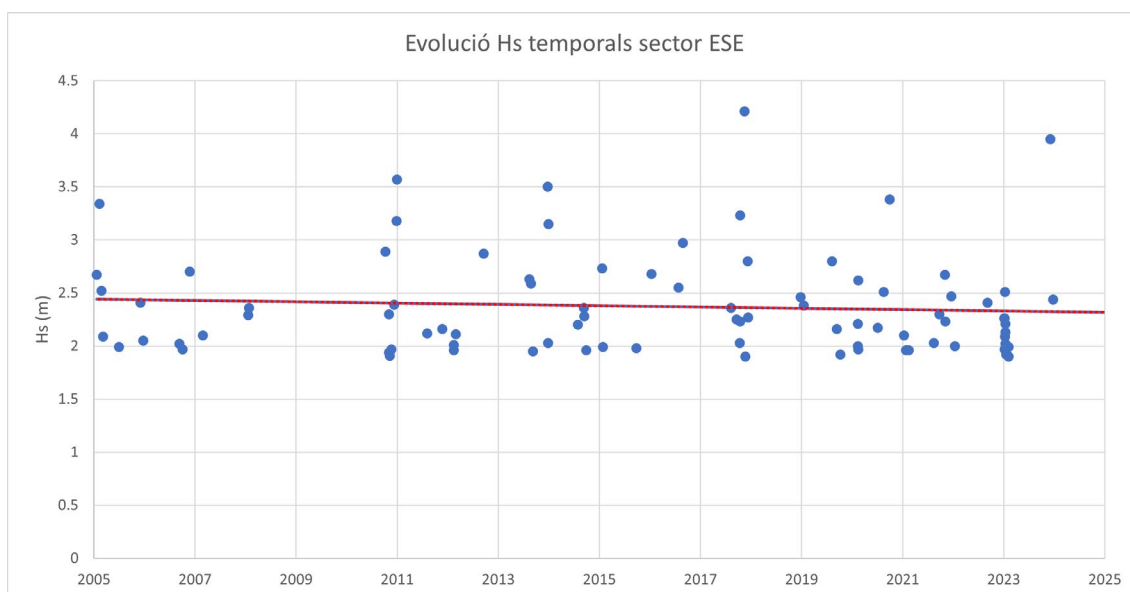
Seguint el mateix procediment que s'ha aplicat al nombre de temporals, els resultats de les tendències de l'alçària d'onada dels temporals de cada sector es mostren a les figures 74-78.

Figura 74. Tendència de l'alçària d'onada dels temporals del sector E



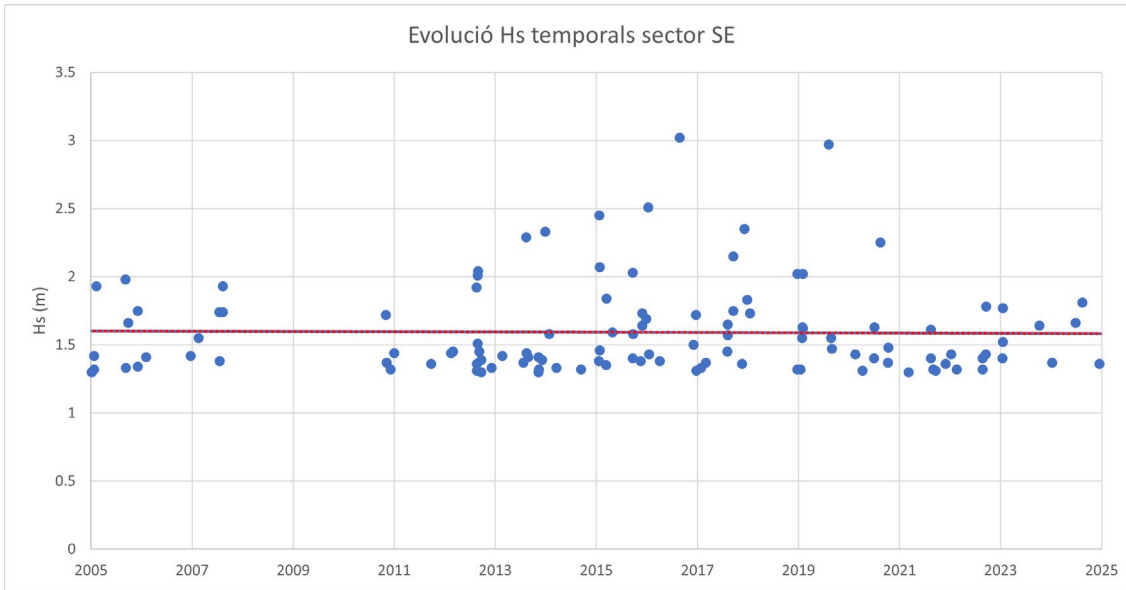
Font: elaboració pròpia.

Figura 75. Tendència de l'alçària d'onada dels temporals del sector ESE



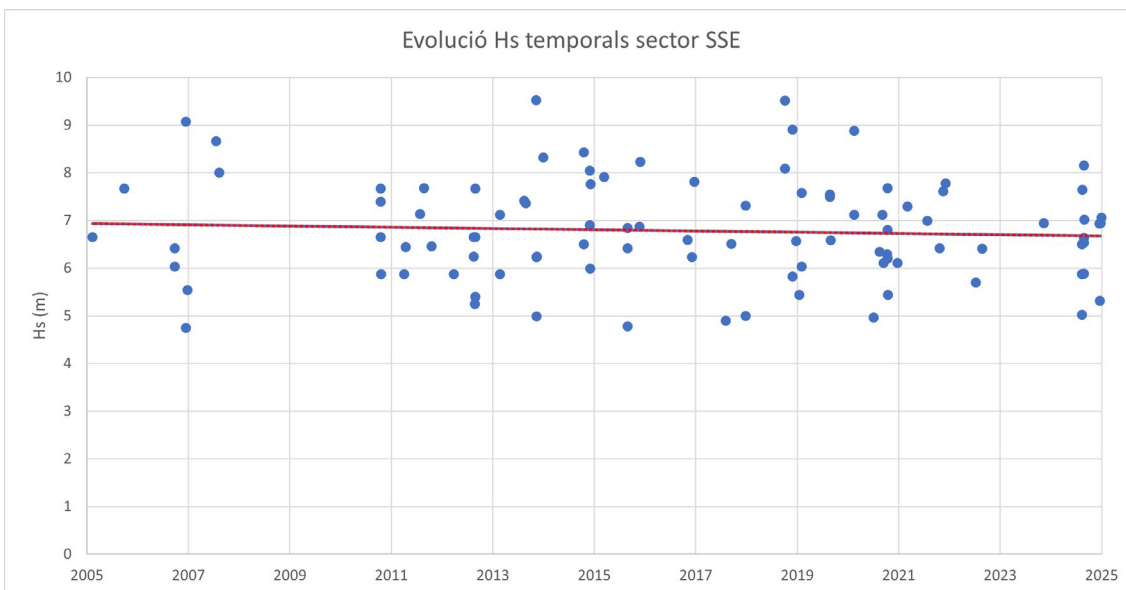
Font: elaboració pròpia.

Figura 76. Tendència de l'alçària d'onada dels temporals del sector SE



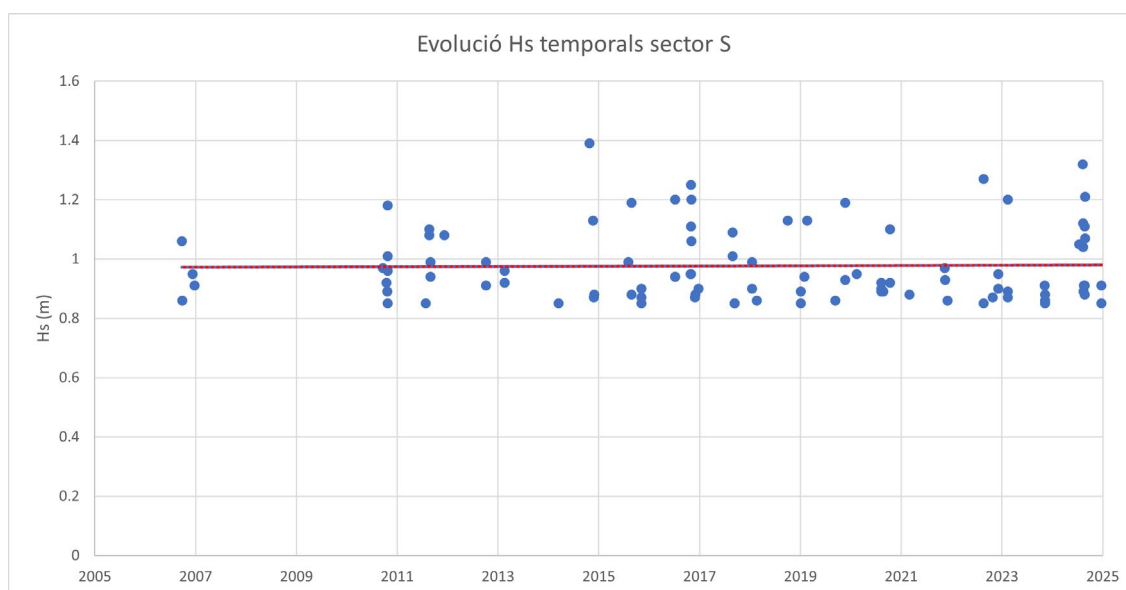
Font: elaboració pròpia.

Figura 77. Tendència de l'alçària d'onada dels temporals del sector SSE



Font: elaboració pròpia.

Figura 78. Tendència de l'alçària d'onada dels temporals del sector S



Font: elaboració pròpia.

En aquest cas, els augments més importants venen dels sectors de llevant, especialment de l'E i del SE. Els sectors del sud no presenten un increment tan marcat, però també mostren un augment en l'alçària d'onada dels temporals al llarg dels darrers anys.

A la taula 18 es mostren les ràtios d'aquestes tendències en increment de l'alçària d'onada dels temporals en centímetres per any i sector.

Taula 18. Ràtio de l'augment de l'alçària d'onada dels temporals per any

	H _s (cm/any)
E	0,13
ESE	-0,62
SE	-0,09
SSE	-1,31
S	0,05

Font: elaboració pròpia.

Com es pot observar, es confirma que els sectors que es veuen més afectats són els de llevant, encara que també destaquen els del sud. Si es consideren conjuntament l'alçària d'onada i el nombre de temporals, els temporals de llevant creixen en intensitat, però disminueixen en freqüència, i, un cop més, els del sud creixen clarament tant en freqüència com en intensitat.

4.2. Punt de Gavà-Castelldefels

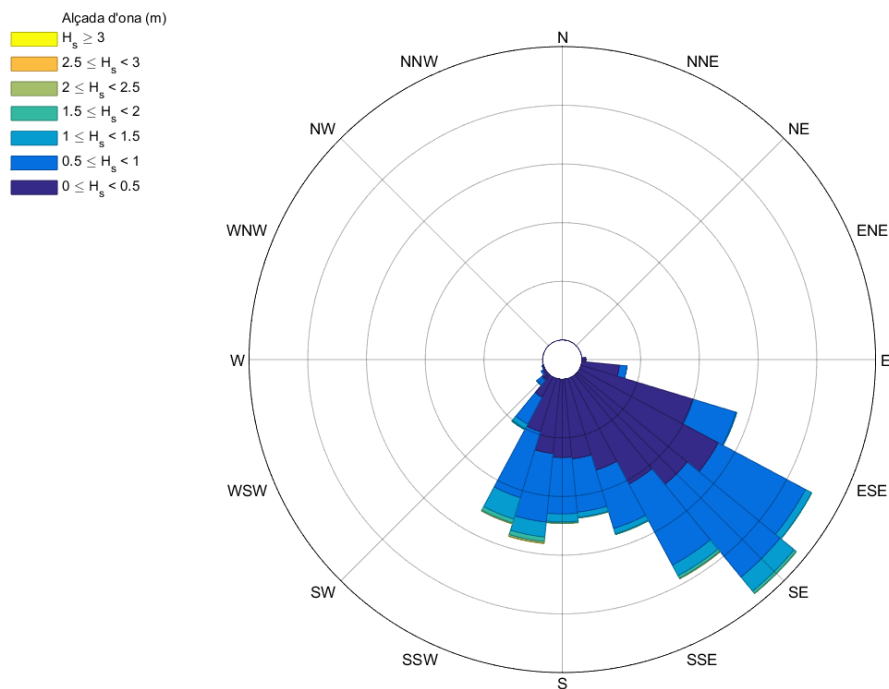
A la figura 79 i a la taula 19 es mostren els resultats per al punt G-C. Tal com s'aprecia, els onatges que arriben a la costa provenen principalment del segon quadrant, ja que són els més freqüents i energètics.

Taula 19. Taula H_s-direcció del punt G-C

Sector/Hs	<=0.5	0.5-1.0	1.0-1.5	1.5-2.0	2.0-2.5	2.5-3.0	>=3.0	%	TOTAL
N	1	0	0	0	0	0	0	0	1
NNE	3	0	0	0	0	0	0	0	3
NE	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ENE	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E	1272	148	0	0	0	0	0	0.92	1420
ESE	19582	7450	243	6	0	0	0	17.67	27281
SE	24309	18478	2512	406	60	11	1	29.65	45777
SSE	16692	10551	1031	192	33	4	0	18.46	28503
S	13458	9490	1274	226	87	21	7	15.91	24563
SSW	9292	10265	2969	629	159	33	11	15.13	23358
SW	1392	1555	226	4	0	0	0	2.06	3177
WSW	170	132	2	0	0	0	0	0.2	304
W	12	4	0	0	0	0	0	0.01	16
WNW	2	0	0	0	0	0	0	0	2
NW	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NNW	0	0	0	0	0	0	0	0	0
%	55.82	37.61	5.35	0.95	0.22	0.04	0.01	100	
TOTAL	86185	58073	8257	1463	339	69	19		154405

Font: elaboració pròpia.

Figura 79. Rosa d'onatge del punt G-C



Font: elaboració pròpia.

Els ajustos de les tendències al node de Gavà i Castelldefels s'han fet per als sis sectors més representatius: l'ESE, el SE, el SSE, el S, el SSW i el SW. A partir dels llindars del mètode

POT, s'obté una mostra d'extrems per a cada sector i el nombre de tempestes a l'any. Tots aquests valors es resumeixen a la taula 20.

Taula 20. Paràmetres de l'ajust extremal del punt G-C pel mètode POT

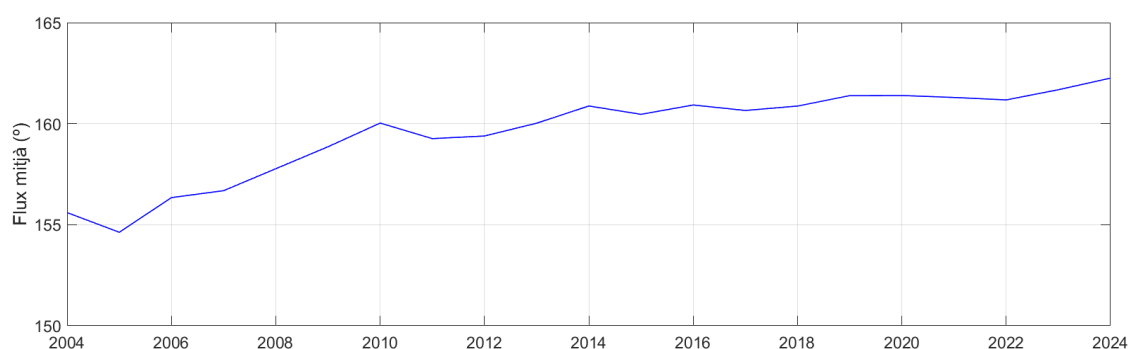
Sector	H _s POT	Nre. temp.
ESE	1,05	100
SE	1,40	115
SSE	1,30	115
S	1,40	101
SSW	1,60	92
SW	1,05	98

Font: elaboració pròpia.

4.2.1. Tendències del flux mitjà

Seguint la mateixa metodologia que en el node anterior, a la figura 80 es mostra l'evolució del flux energètic mitjà al llarg dels anys a la zona de Gavà i Castelldefels.

Figura 80. Evolució del flux energètic mitjà acumulat



Font: elaboració pròpia.

A la gràfica es poden observar les fluctuacions pròpies dels primers anys per la falta de dades acumulades, com en altres casos. Des de l'any 2005 fins al 2010, comença un gir clar del flux mitjà fins a una estabilització entorn dels 160°, tot i que la tendència no s'atura i continua al llarg dels anys següents, fins al punt que es pot afirmar que hi ha hagut un gir cap al sud del flux energètic mitjà d'uns 4° en els últims quinze anys.

Això vol dir que l'energia, de mitjana, també aquí s'està desplaçant des de les direccions de llevant cap al sud.

4.2.2. Tendències del nombre de temporals

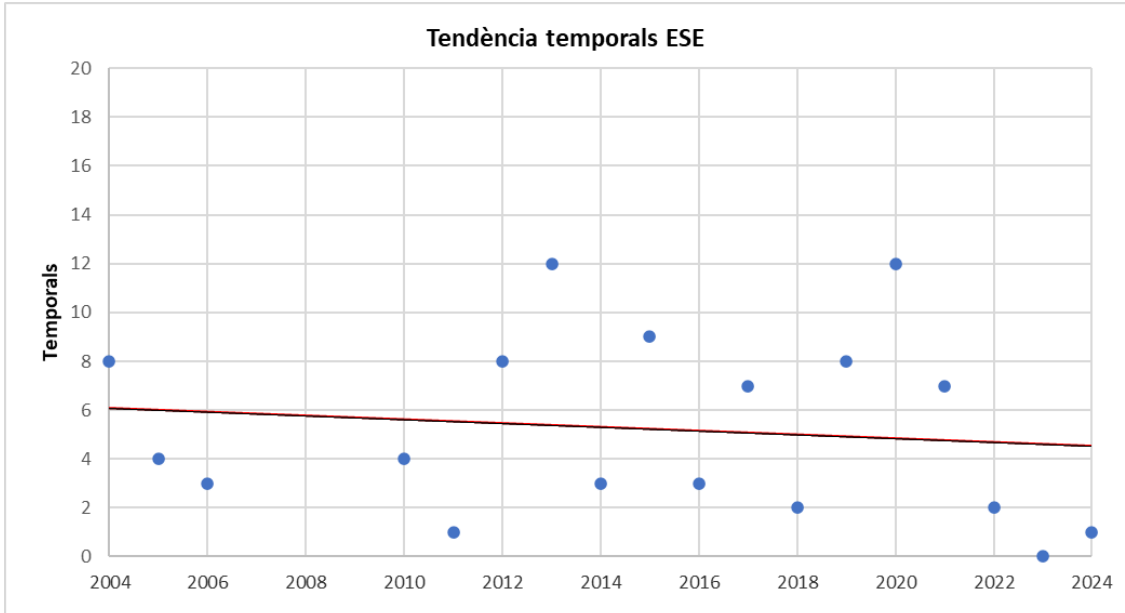
La distribució sectorial de l'onatge permet calcular els temporals en cada sector que s'hagi seleccionat prèviament. En aquest cas, l'anàlisi extremal dels sectors més energètics s'ha fet a partir de l'obtenció d'una mostra d'extrems representativa, seleccionant els temporals pel mètode del llindar o POT (*peak over threshold*).

Atenent la capacitat energètica dels diferents onatges, s'analitzen, d'una banda, els que presenten temporals de llevant (els més energètics) i, de l'altra, els temporals del sud, de manera que queda comprès del sector ESE al sector SW.

Respecte al node de Badalona, s'aprecia que en aquesta zona els onatges arriben tots més orientats cap al sud, per l'efecte de la batimetria al sud de la ciutat de Barcelona, la qual cosa fa que hi hagi, en general, una refracció dels onatges més gran, que tendeixen a orientar-se perpendiculars a la costa.

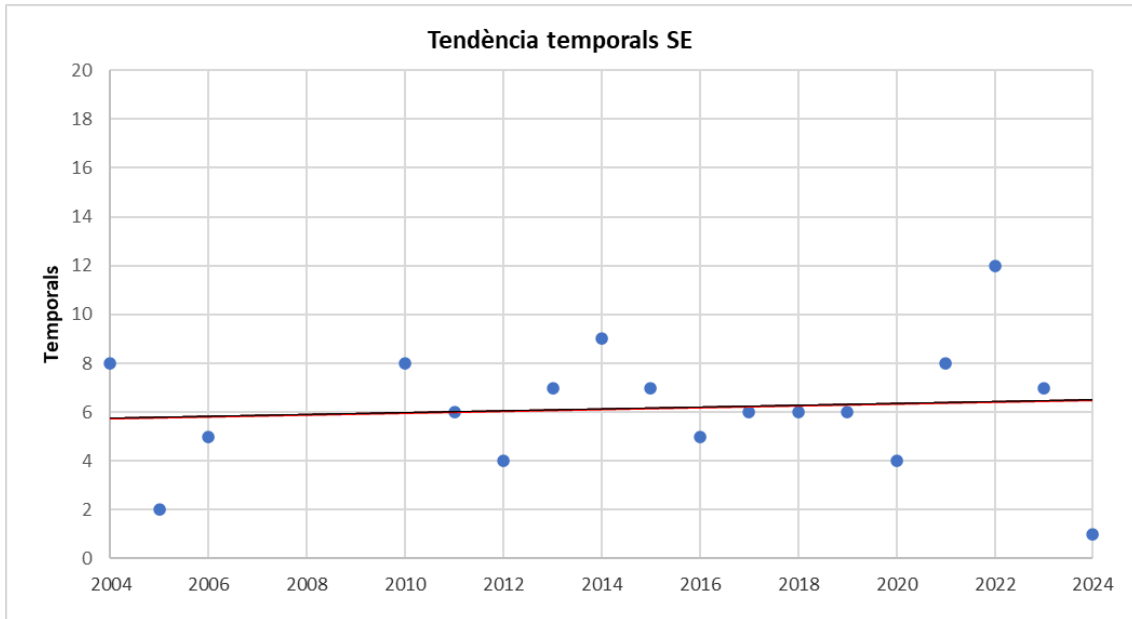
Els resultats d'aquestes tendències es mostren a les figures 81-86.

Figura 81. Tendència del nombre de temporals del sector ESE



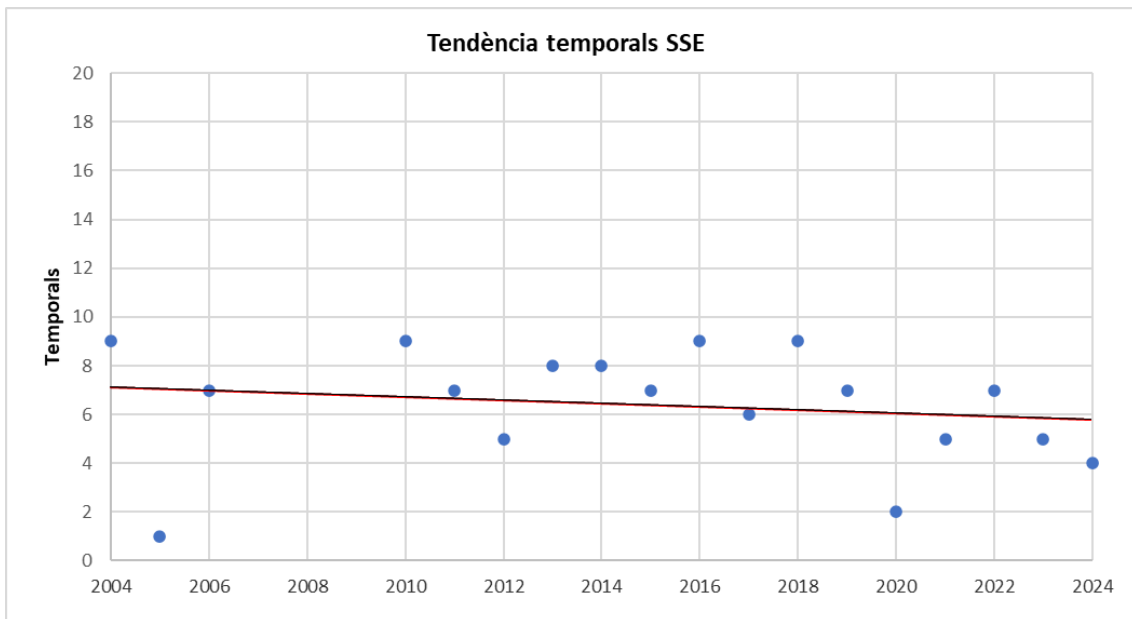
Font: elaboració pròpia.

Figura 82. Tendència del nombre de temporals del sector SE



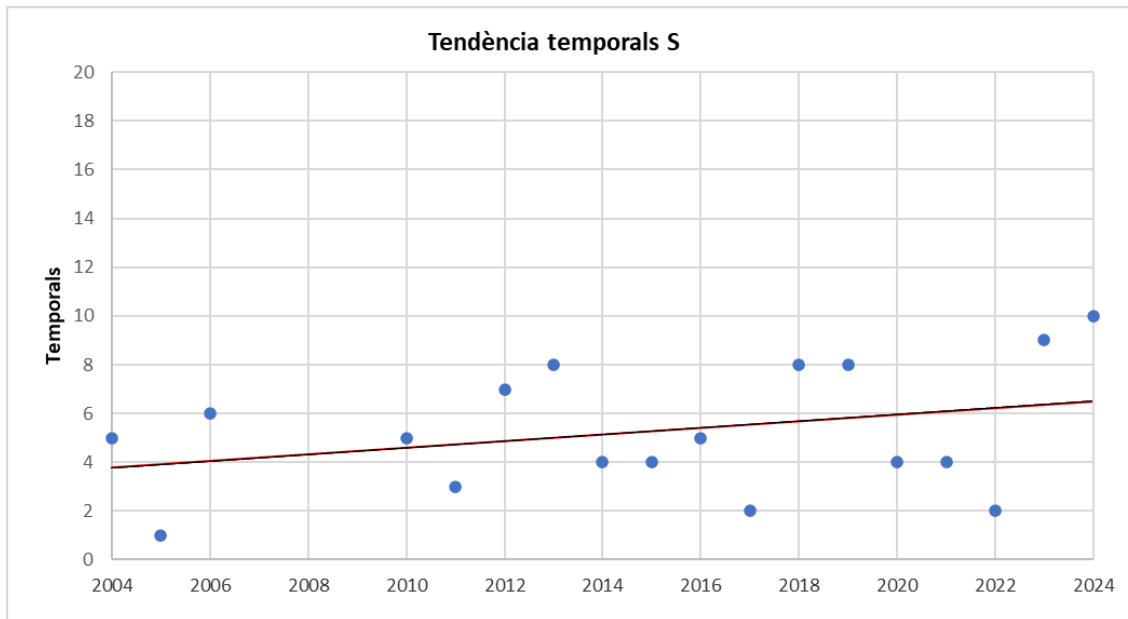
Font: elaboració pròpia.

Figura 83. Tendència del nombre de temporals del sector SSE



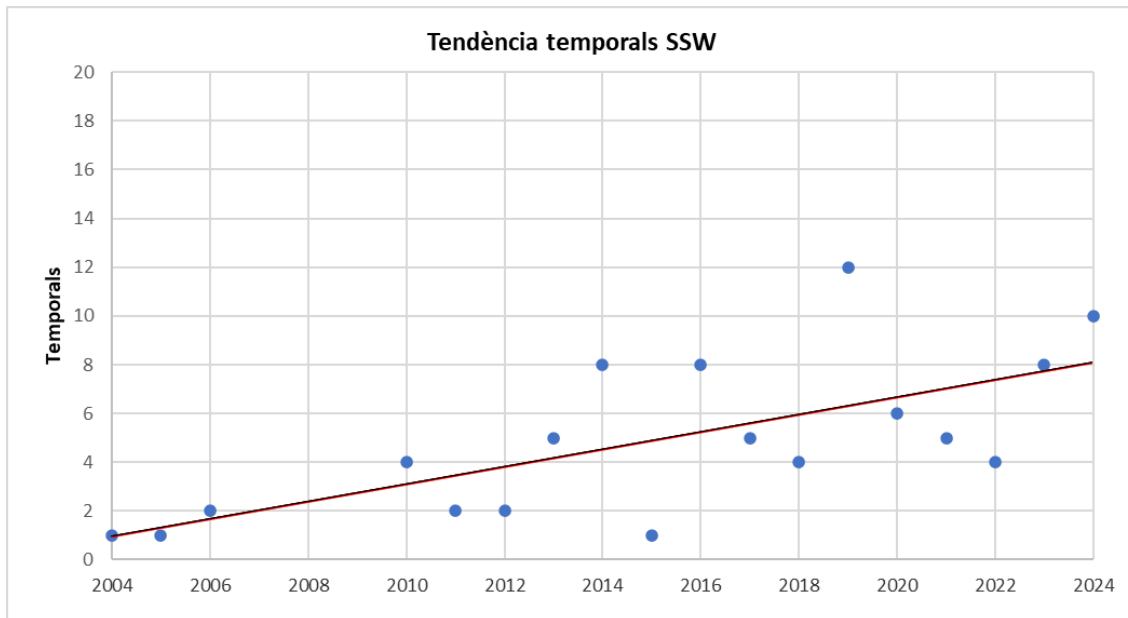
Font: elaboració pròpia.

Figura 84. Tendència del nombre de temporals del sector S



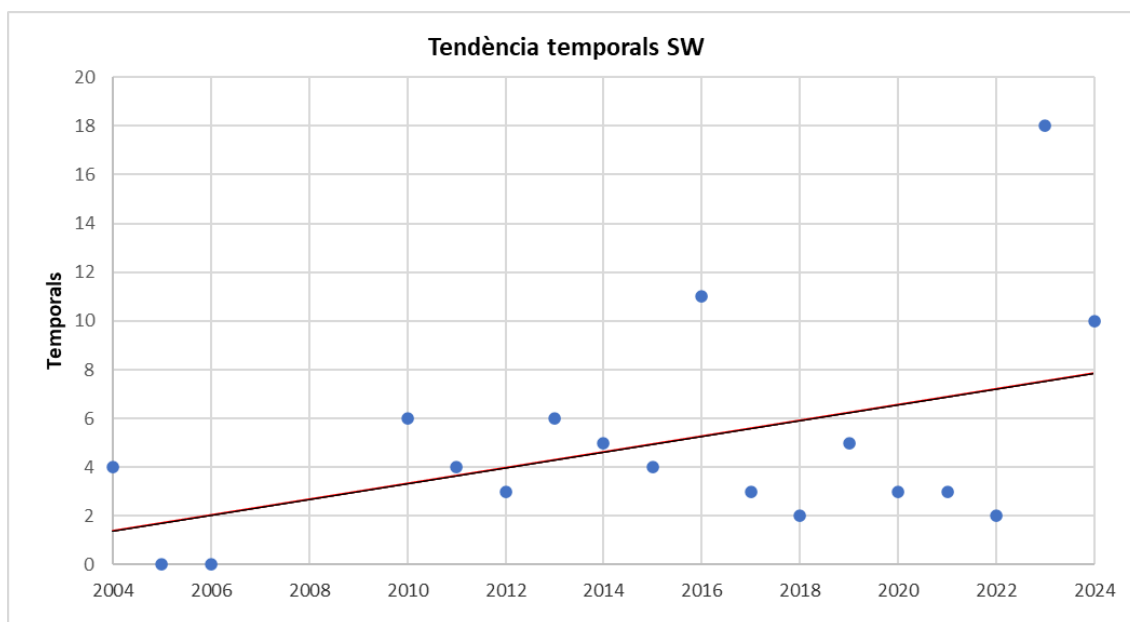
Font: elaboració pròpia.

Figura 85. Tendència del nombre de temporals del sector SSW



Font: elaboració pròpia.

Figura 86. Tendència del nombre de temporals del sector SW



Font: elaboració pròpia.

Un cop més, s'aprecia que els temporals de llevant mostren una tendència, en general, a la baixa (tret del sector SE), mentre que els temporals de garbí tenen una clara tendència a l'alça, en especial els sectors SSW i SW.

A la taula 21 es mostren les ràtios d'aquestes tendències en increment de temporals per any i sector.

Taula 21. Ràtio de l'augment de temporals per any

	Ràtios de temporals
ESE	-0,08
SE	0,04
SSE	-0,07
S	0,14
SSW	0,36
SW	0,32

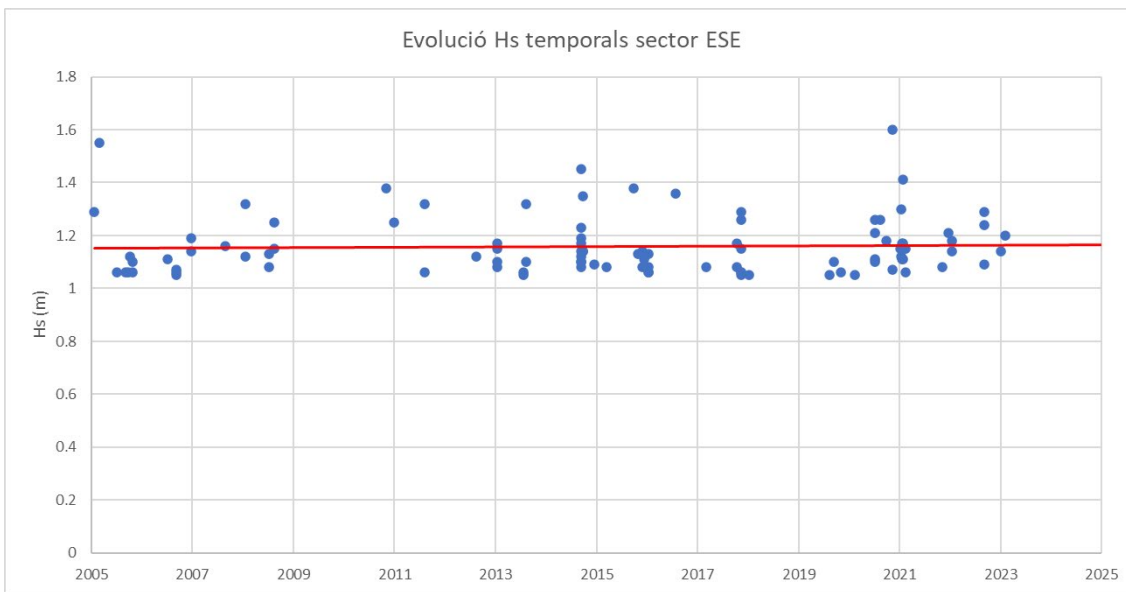
Font: elaboració pròpia.

Com es pot observar, es confirma que la freqüència de temporals de llevant es redueix, mentre que augmenta la dels sectors del sud.

4.2.3. Tendències de l'alçària d'onada

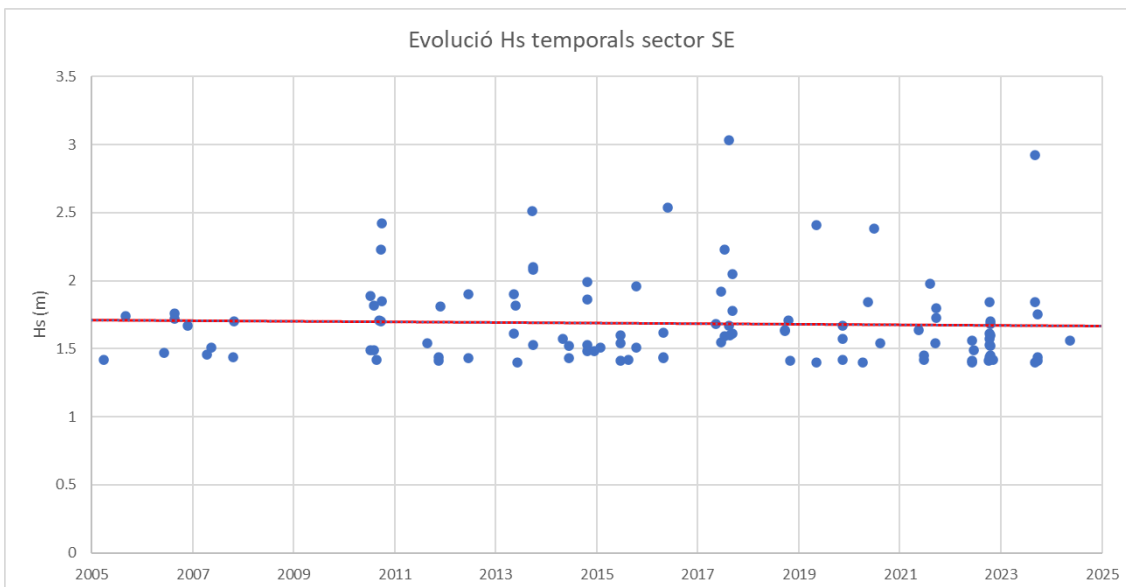
Seguint el mateix procediment que s'ha aplicat al nombre de temporals, els resultats de les tendències de l'alçària d'onada dels temporals de cada sector es mostren a les figures 87-92.

Figura 87. Tendència de l'alçària d'onada dels temporals del sector ESE



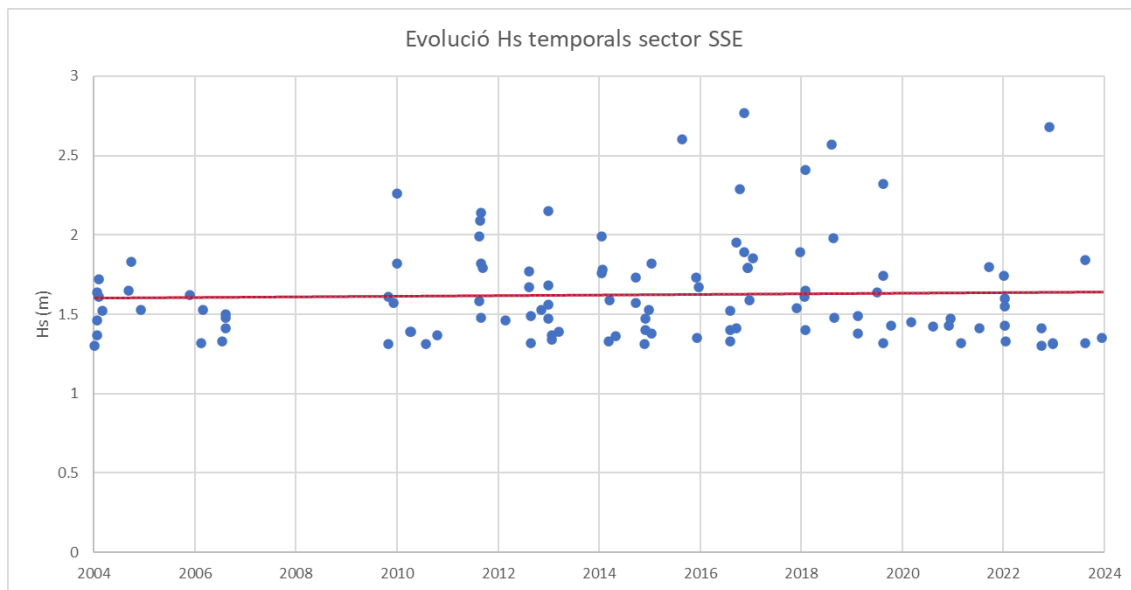
Font: elaboració pròpia.

Figura 88. Tendència de l'alçària d'onada dels temporals del sector SE



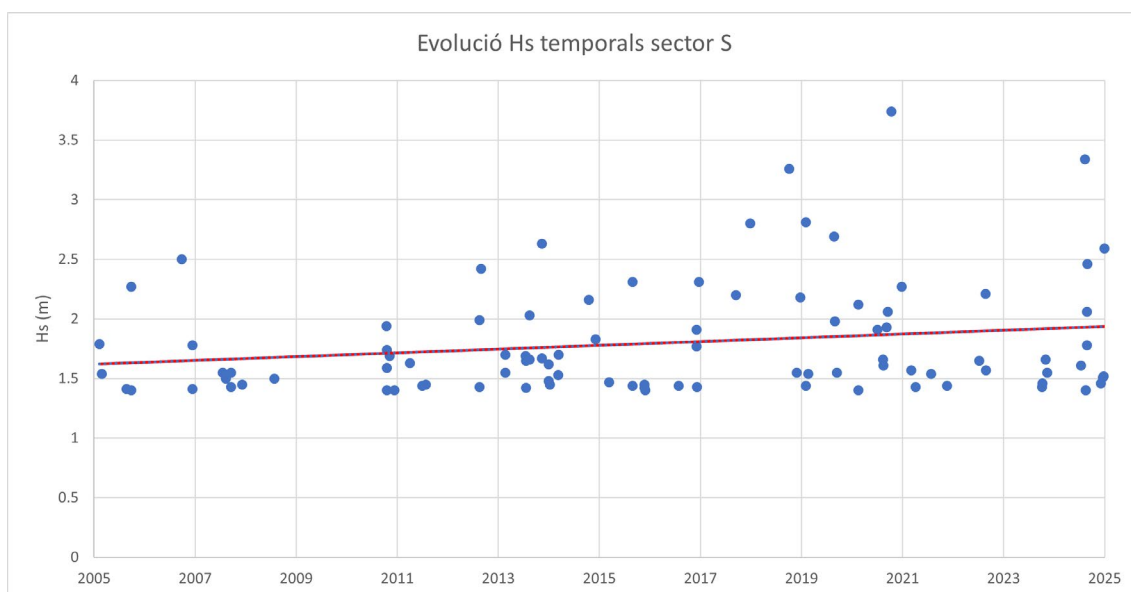
Font: elaboració pròpia.

Figura 89. Tendència de l'alçària d'onada dels temporals del sector SSE



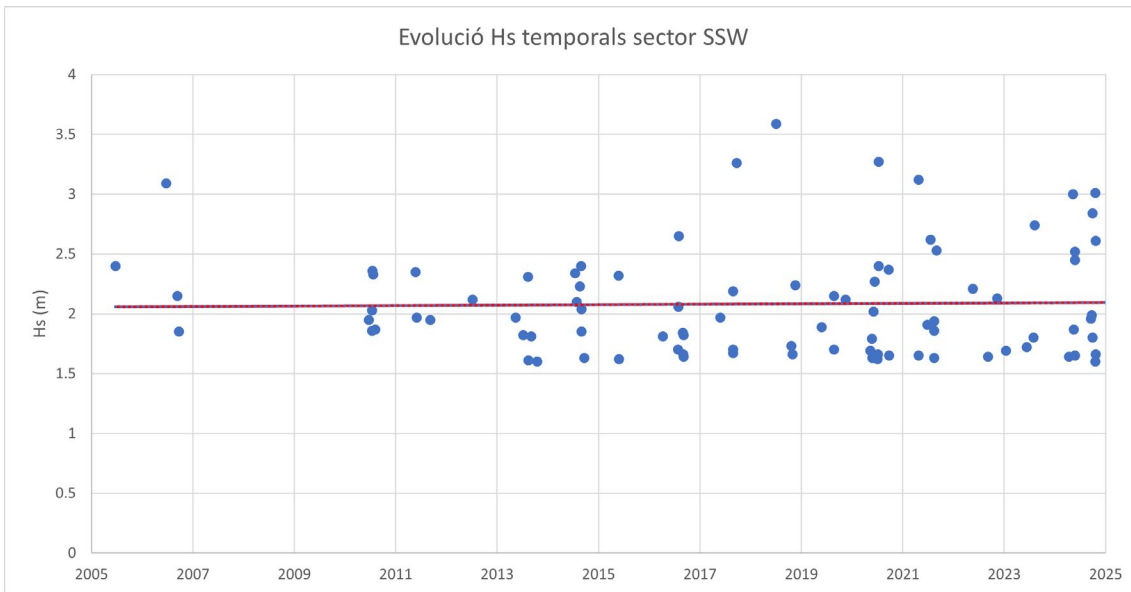
Font: elaboració pròpia.

Figura 90. Tendència de l'alçària d'onada dels temporals del sector S



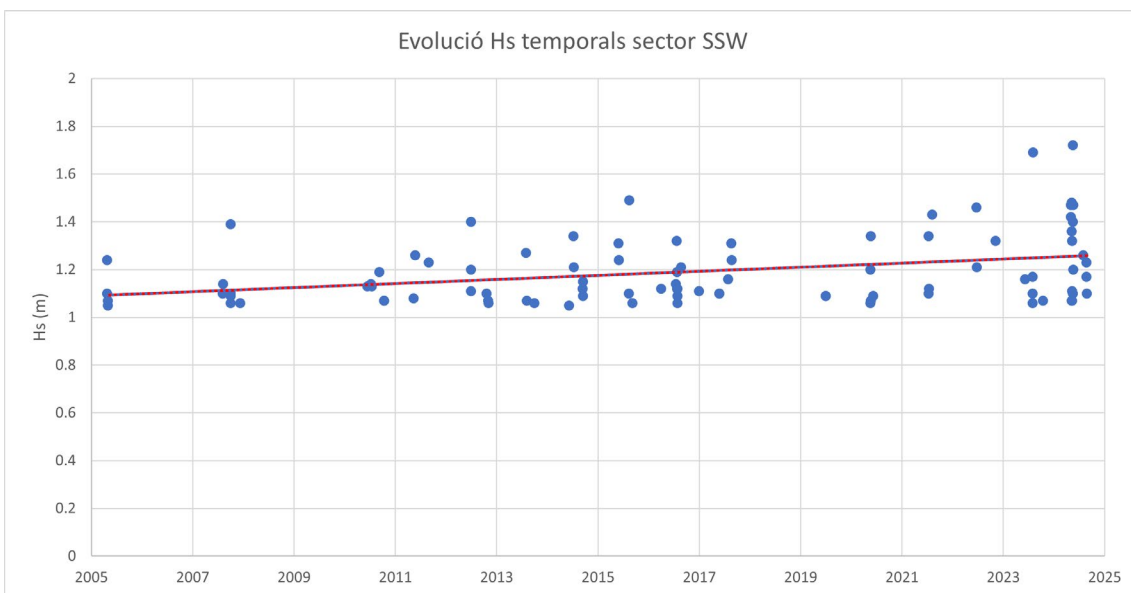
Font: elaboració pròpia.

Figura 91. Tendència de l'alçària d'onada dels temporals del sector SSW



Font: elaboració pròpia.

Figura 92. Tendència de l'alçària d'onada dels temporals del sector SW



Font: elaboració pròpia.

En aquest cas, els augments més importants venen dels sectors SSE i SW. Només el sector SE mostra una tendència a reduir el valor de H_s , mentre que la resta augmenten.

A la taula 22 es mostren les ràtios d'aquestes tendències en increment d'alçària d'onada dels temporals en centímetres per any i sector.

Taula 22. Ràtio de l'augment de l'alçària d'onada dels temporals per any

	H_s (cm/any)
ESE	0,06
SE	-0,22
SSE	0,20
S	1,58
SSW	0,18
SW	0,91

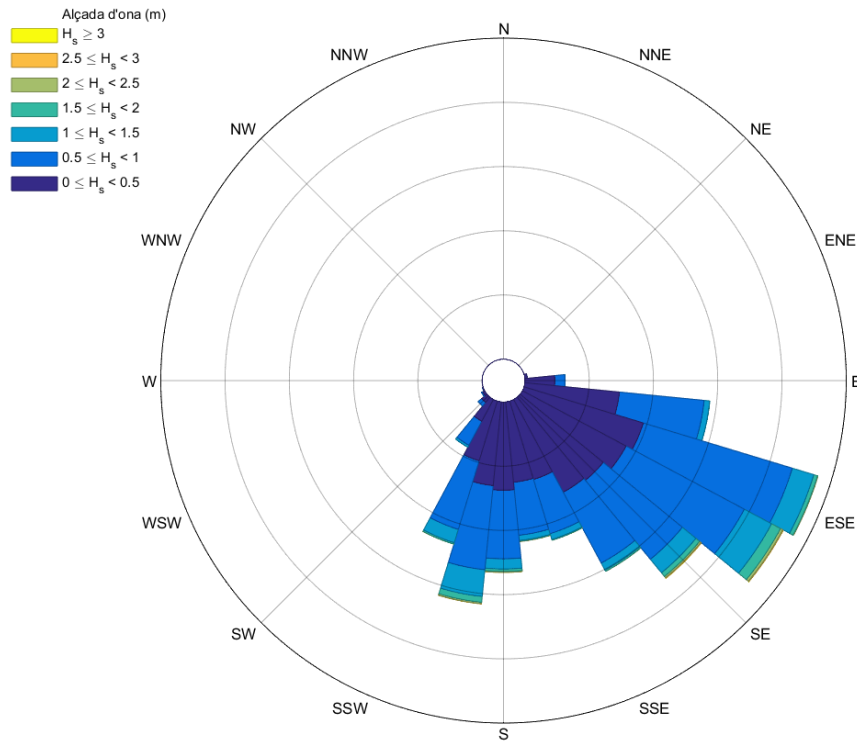
Font: elaboració pròpia.

Si es consideren conjuntament l'alçària d'onada i el nombre de temporals, els temporals de llevant creixen en intensitat, però disminueixen en freqüència, i els de garbí augmenten tant en freqüència com en intensitat. De tots, destaca el SW, que creix notablement en freqüència i en intensitat.

4.3. Punt del Prat-Viladecans

A la figura 93 i a la taula 23 es mostren els resultats per al punt P-V. Novament, tal com s'aprecia, els onatges que arriben a la costa provenen principalment del segon quadrant, ja que són els més freqüents i energètics.

Figura 93. Rosa d'onatge del punt P-V



Font: elaboració pròpia.

Taula 23. Taula H_s-direcció del punt P-V

Sector/Hs	<=0.5	0.5-1.0	1.0-1.5	1.5-2.0	2.0-2.5	2.5-3.0	>=3.0	%	TOTAL
N	1	0	0	0	0	0	0	0	1
NNE	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NE	1	0	0	0	0	0	0	0	1
ENE	45	1	0	0	0	0	0	0.03	46
E	5199	2719	99	3	0	0	0	5.19	8020
ESE	18006	19637	3080	618	106	18	0	26.85	41465
SE	16234	14567	2497	745	225	75	17	22.25	34360
SSE	13265	8753	834	126	23	8	0	14.9	23009
S	12458	9198	1701	444	141	24	11	15.53	23977
SSW	8913	9547	2205	258	42	4	0	13.58	20969
SW	1325	1044	30	0	0	0	0	1.55	2399
WSW	97	55	0	0	0	0	0	0.1	152
W	2	1	0	0	0	0	0	0	3
WNW	3	0	0	0	0	0	0	0	3
NW	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NNW	0	0	0	0	0	0	0	0	0
%	48.93	42.44	6.77	1.42	0.35	0.08	0.02	100	
TOTAL	75549	65522	10446	2194	537	129	28		154405

Font: elaboració pròpia.

Els ajustos de les tendències al node de Gavà i Castelldefels s'han fet per als set sectors més representatius: l'E, l'ESE, el SE, el SSE, el S, el SSW i el SW. A partir dels llistats del mètode POT, s'obté una mostra d'extremes per a cada sector i el nombre de tempestes a l'any. Tots aquests valors es resumeixen a la taula 24.

Taula 24. Paràmetres de l'ajust extremal del punt P-V pel mètode POT

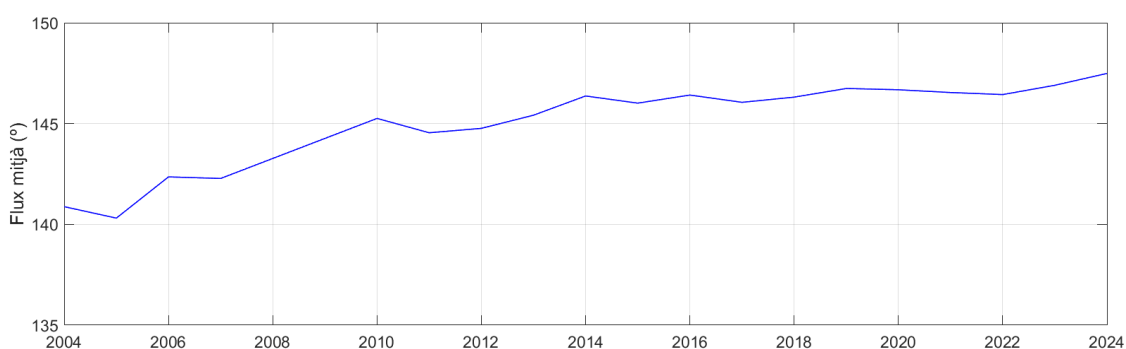
Sector	H _s POT	Nre. temp.
E	0,95	95
ESE	1,60	90
SE	1,60	103
SSE	1,25	103
S	1,50	94
SSW	1,40	109
SW	0,85	87

Font: elaboració pròpia.

4.3.1. Tendències del flux mitjà

A la figura 94 es mostra l'evolució del flux energètic mitjà acumulat al llarg dels anys a la zona del Prat i Viladecans.

Figura 94. Evolució del flux energètic mitjà acumulat



Font: elaboració pròpia.

A la gràfica, un cop més, es poden veure les fluctuacions pròpies dels primers anys per la falta de dades acumulades. Des de l'any 2006 fins al 2014 s'observa un gir cap al sud, que passa d'uns 143° a uns 147°, és a dir, 4° en vuit anys, 0,5° per any. A partir d'aleshores, la tendència a virar cap al sud es manté, però es redueix a una ràtio d'uns 0,1° a l'any. Igualment, es pot assegurar que l'energia mitjana s'està desplaçant des de les direccions de llevant cap al sud.

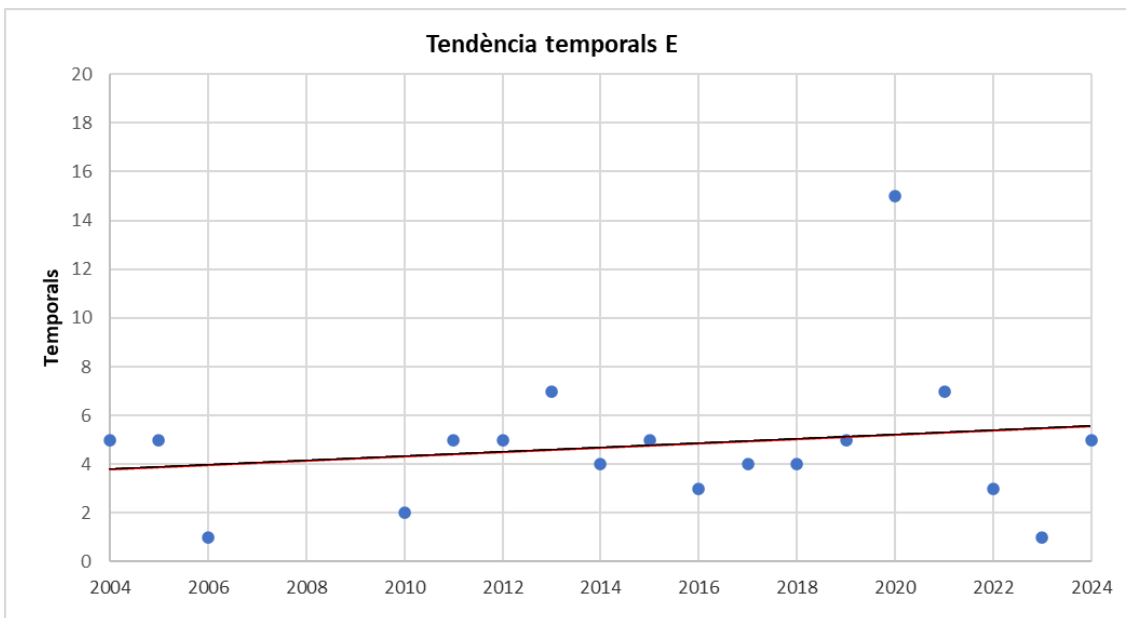
4.3.2. Tendències del nombre de temporals

La distribució sectorial de l'onatge permet calcular els temporals en cada sector que s'hagi seleccionat prèviament. En aquest cas, l'anàlisi extremal dels sectors més energètics s'ha fet a partir de l'obtenció d'una mostra d'extremes representativa, en què s'han seleccionat els temporals pel mètode del llindar o POT (*peak over threshold*).

Atenent la capacitat energètica dels diferents onatges, s'analitzen, d'una banda, els que presenten els temporals de llevant (els més energètics) i, de l'altra, els temporals del sud, de manera que comprenen del sector E al sector SW.

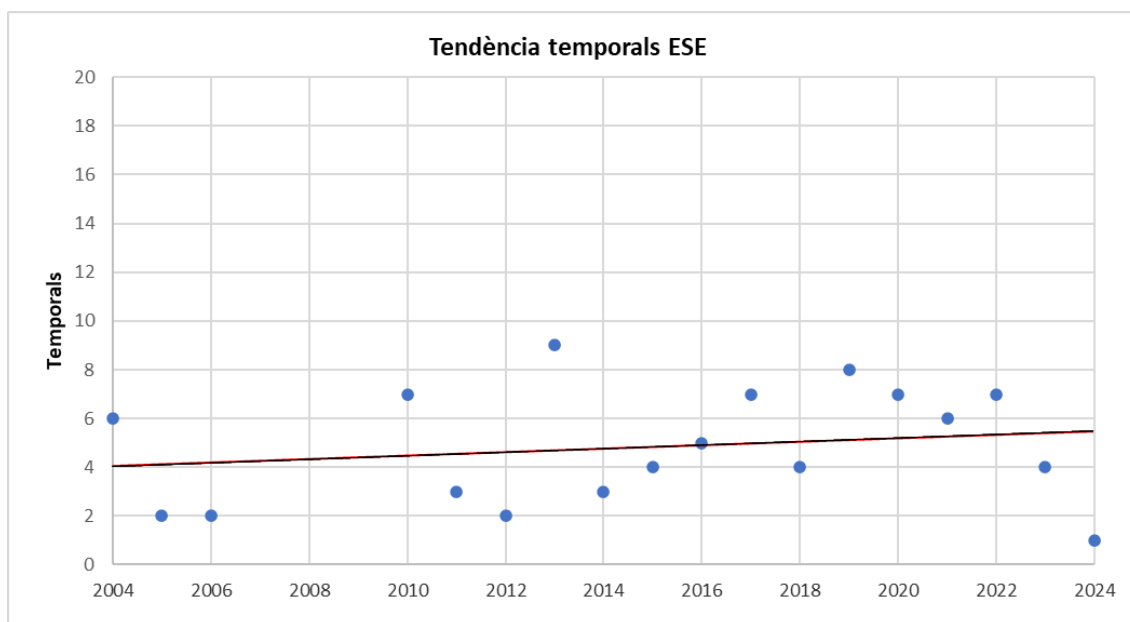
Els resultats d'aquestes tendències es mostren a les figures 95-101.

Figura 95. Tendència del nombre de temporals del sector E



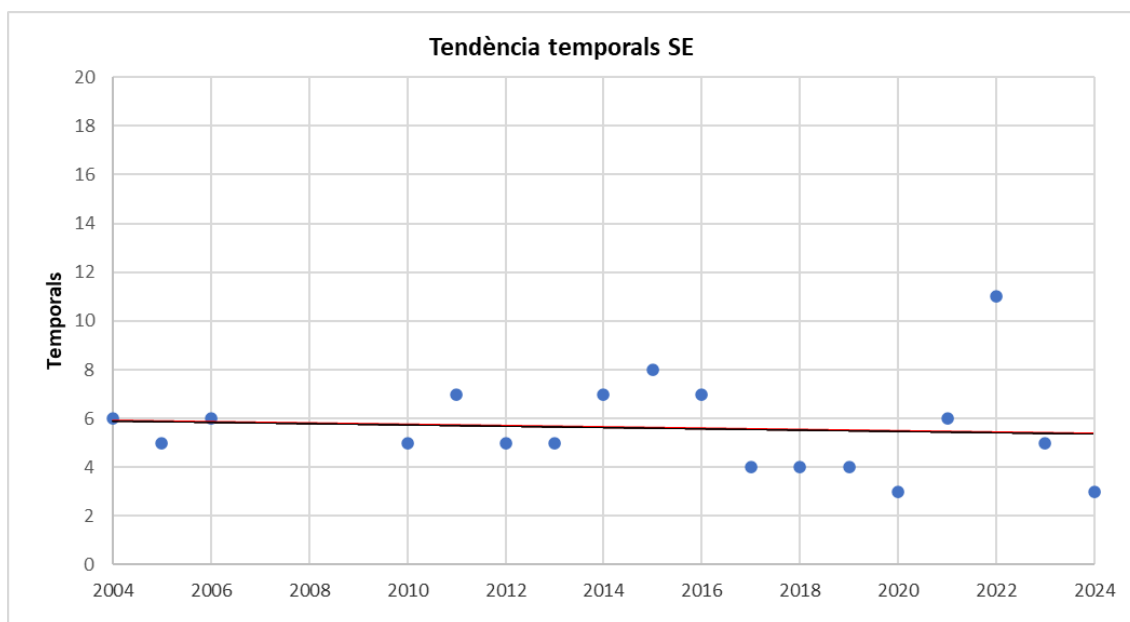
Font: elaboració pròpia.

Figura 96. Tendència del nombre de temporals del sector ESE



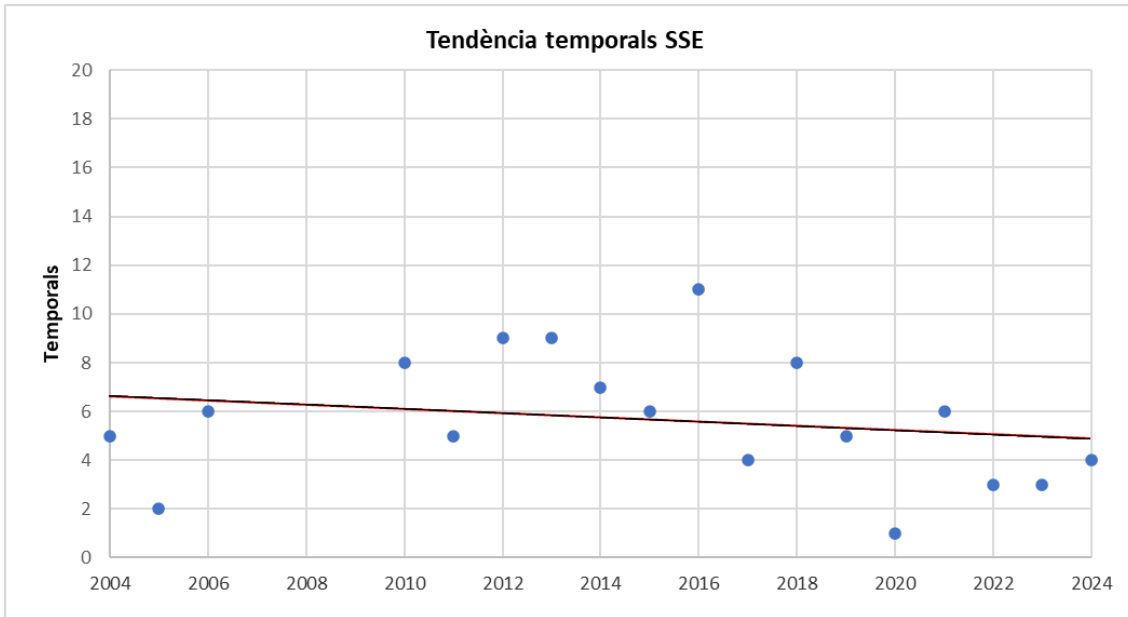
Font: elaboració pròpia.

Figura 97. Tendència del nombre de temporals del sector SE



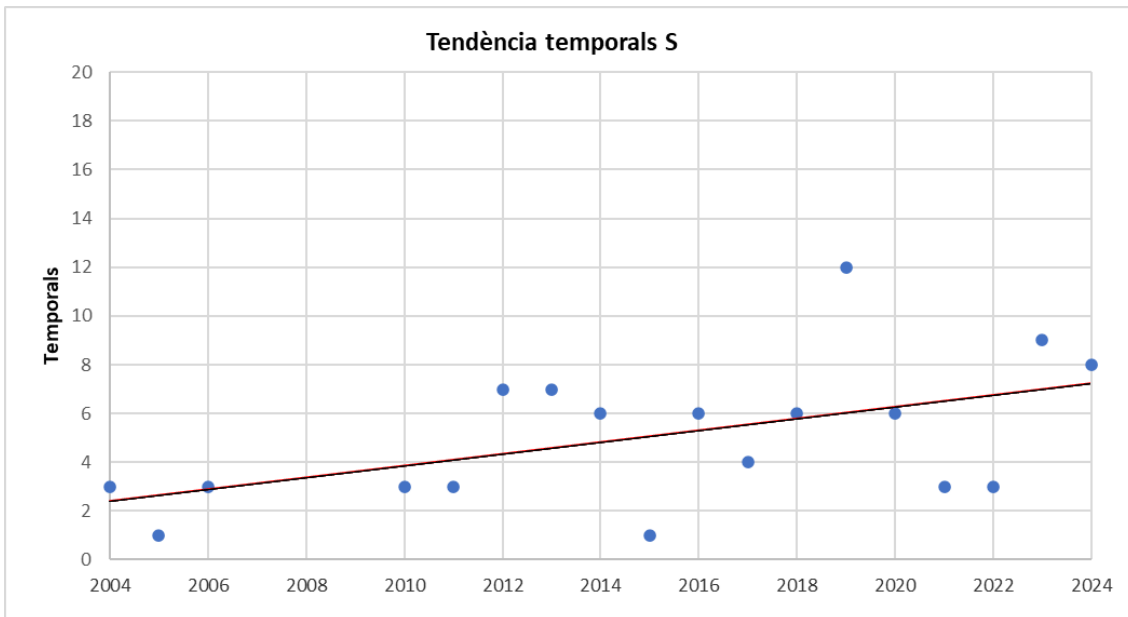
Font: elaboració pròpia.

Figura 98. Tendència del nombre de temporals del sector SSE



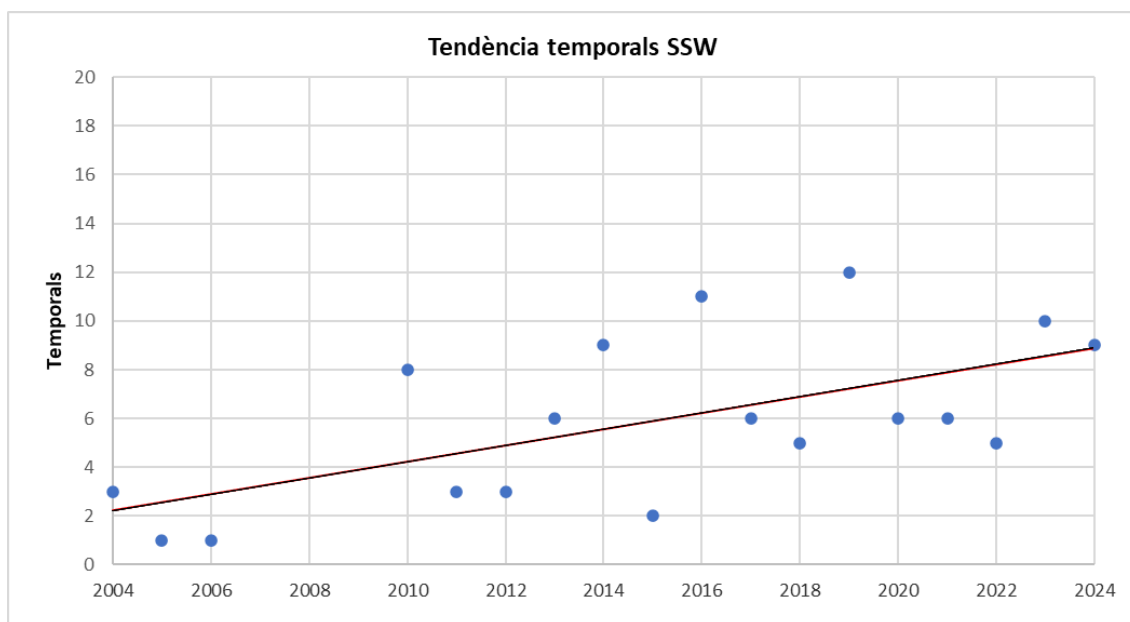
Font: elaboració pròpia.

Figura 99. Tendència del nombre de temporals del sector S



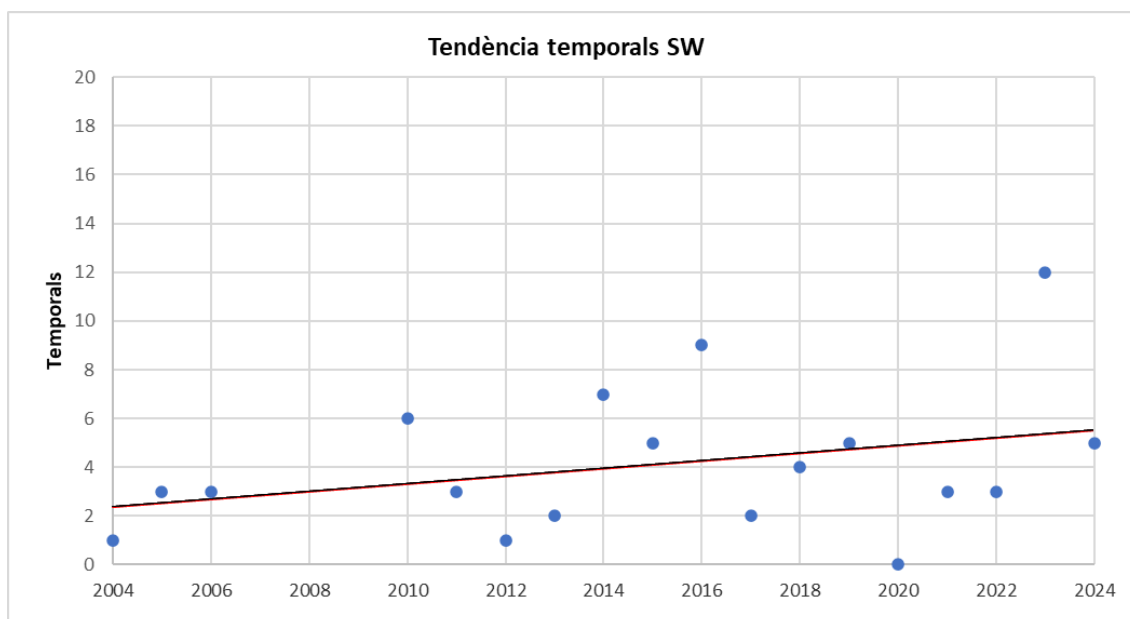
Font: elaboració pròpia.

Figura 100. Tendència del nombre de temporals del sector SSW



Font: elaboració pròpia.

Figura 101. Tendència del nombre de temporals del sector SW



Font: elaboració pròpia.

Es pot observar que, per als temporals de llevant, l'E i l'ESE mostren tendències lleugerament creixents, mentre que el SE i el SSE disminueixen lleugerament. Però, en canvi, i com succeeix a la resta de platges, els temporals de garbí mostren unes tendències creixents que impliquen un augment important en el nombre de temporals al llarg dels anys.

A la taula 25 es mostren les ràtios d'aquestes tendències en increment de temporals per any i sector.

Taula 25. Ràtio de l'augment de temporals per any

	Ràtios de temporals
E	0,09
ESE	0,07
SE	-0,03
SSE	-0,09
S	0,24
SSW	0,33
SW	0,16

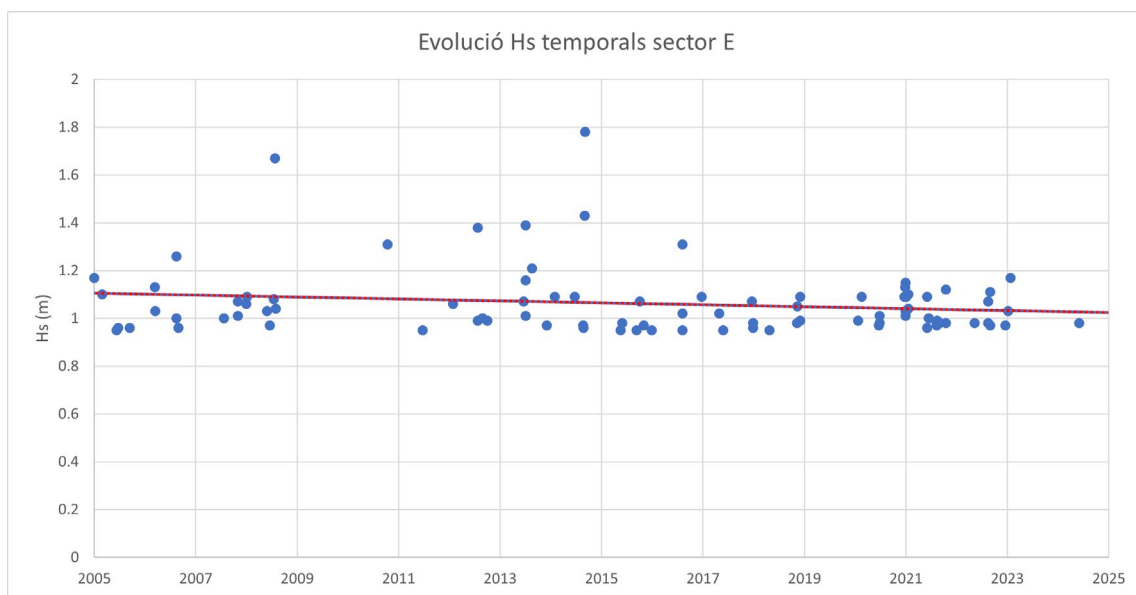
Font: elaboració pròpia.

Com es pot observar, es confirma que el nombre de temporals de llevant es manté relativament igual i augmenta, en canvi, els temporals als sectors del sud.

4.3.3. Tendències de l'alçària d'onada

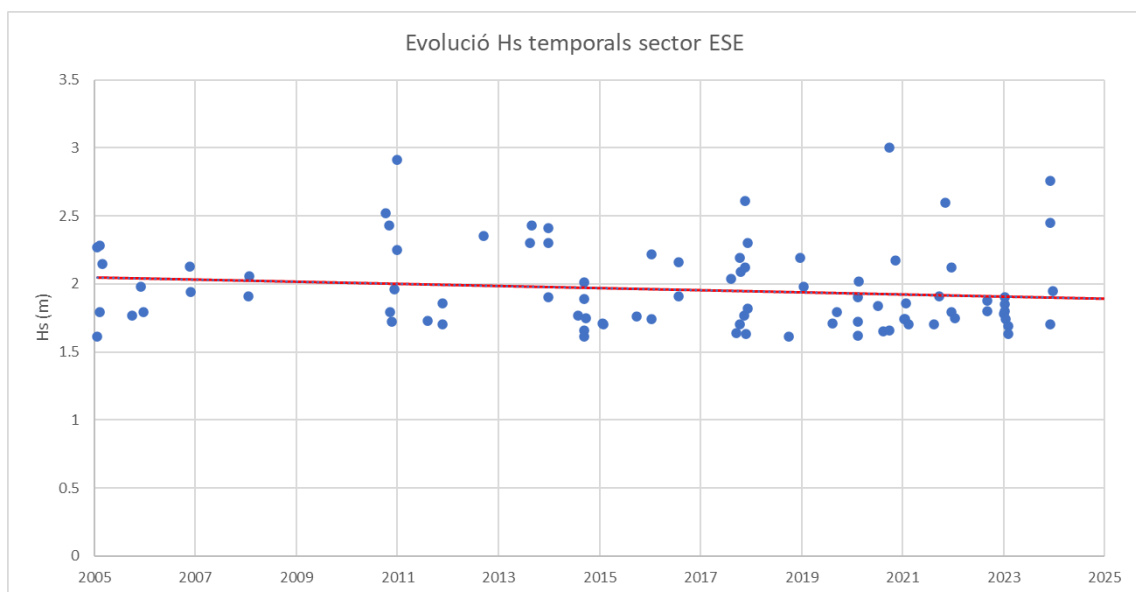
Seguint el mateix procediment que s'ha aplicat al nombre de temporals, els resultats de les tendències de l'alçària d'onada dels temporals de cada sector es mostren a les figures 102-108.

Figura 102. Tendència de l'alçària d'onada dels temporals del sector E



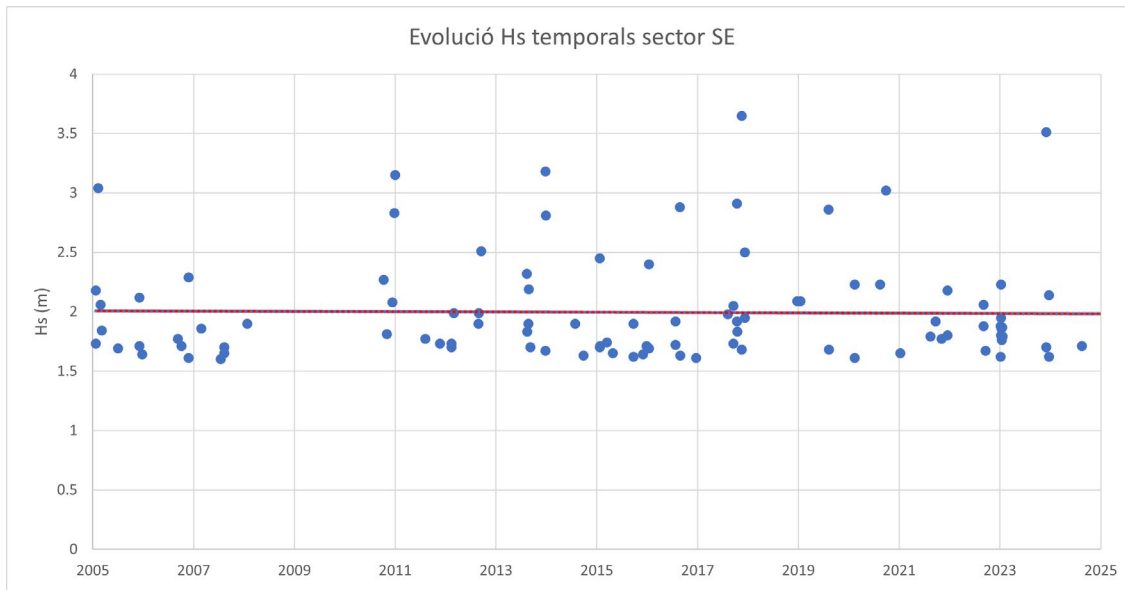
Font: elaboració pròpia.

Figura 103. Tendència de l'alçària d'onada dels temporals del sector ESE



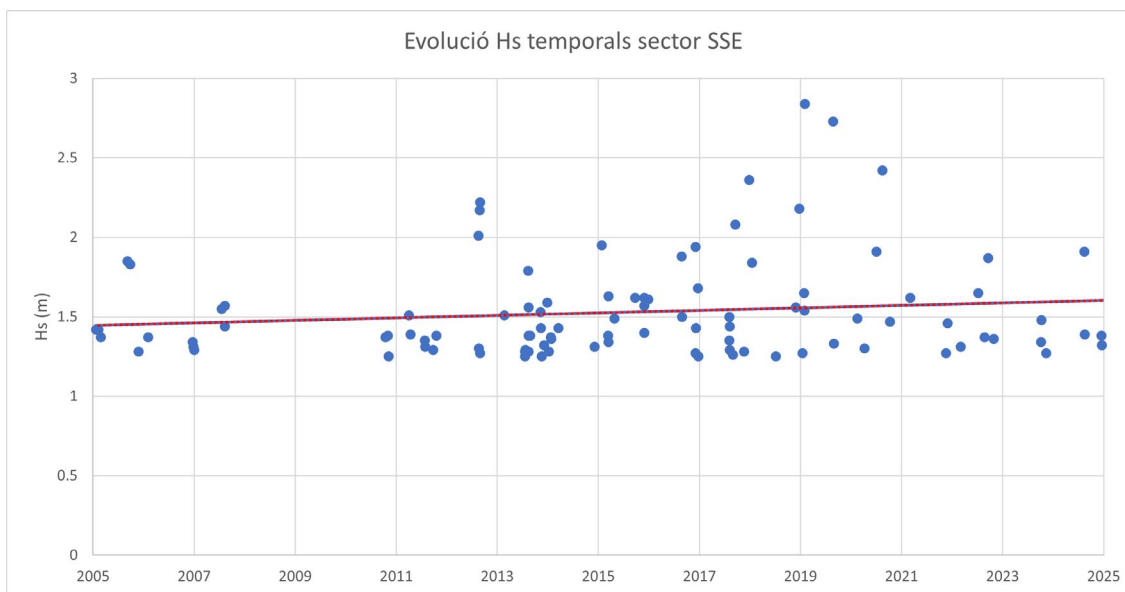
Font: elaboració pròpia.

Figura 104. Tendència de l'alçària d'onada dels temporals del sector SE



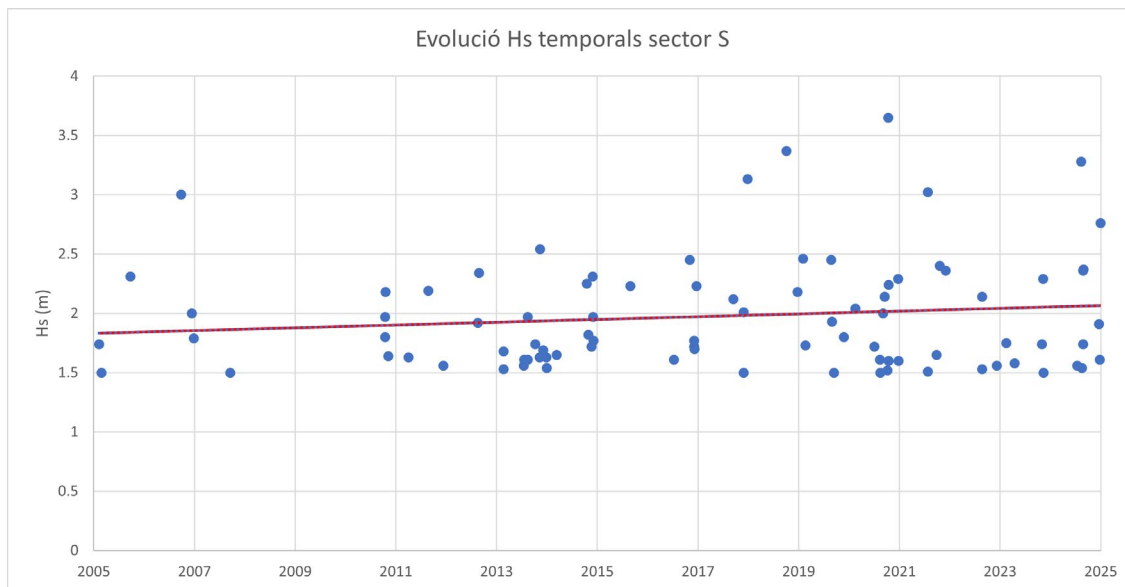
Font: elaboració pròpia.

Figura 105. Tendència de l'alçària d'onada dels temporals del sector SSE



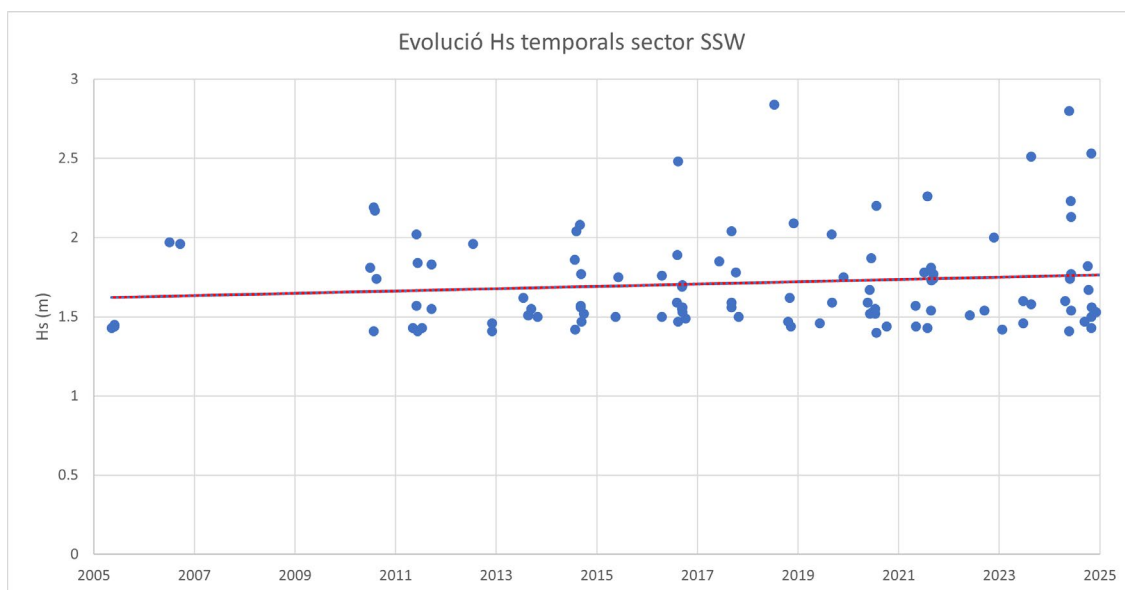
Font: elaboració pròpia.

Figura 106. Tendència de l'alçària d'onada dels temporals del sector S



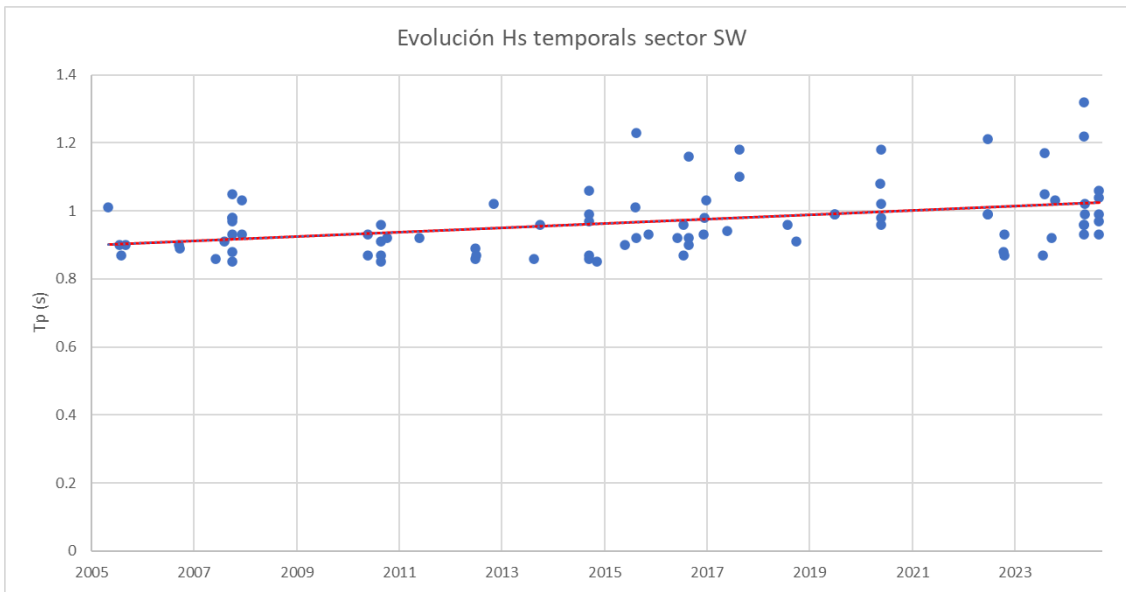
Font: elaboració pròpia.

Figura 107. Tendència de l'alçària d'onada dels temporals del sector SSW



Font: elaboració pròpia.

Figura 108. Tendència de l'alçària d'onada dels temporals del sector SW



Font: elaboració pròpia.

En aquest cas, s'aprecia que als sectors de llevant disminueixen els valors de l'alçària d'onada associada als temporals, mentre que els temporals de garbí mostren una clara tendència a l'alça, en especial el sector S.

A la taula 26 es mostren les ràtios d'aquestes tendències en increment d'alçària d'onada dels temporals en centímetres per any i sector.

Taula 26. Ràtio de l'augment de l'alçària d'onada dels temporals per any

	H _s (cm/any)
E	-0,40
ESE	-0,78
SE	-0,14
SSE	0,78
S	1,17
SSW	0,72
SW	0,63

Font: elaboració pròpia.

Si es consideren conjuntament l'alçària d'onada i el nombre de temporals, els temporals de llevant creixen en intensitat, però disminueixen en freqüència, i els del sud creixen tant en freqüència com en intensitat. En aquest cas, destaquen els sectors S i SSW, que creixen notablement en freqüència i en intensitat.

És evident que aquestes tendències, motivades pels canvis dels patrons generals i de situacions sinòptiques que afecten la costa catalana (com la tendència a la baixa de les tramuntanes), poden continuar en el futur, si es manté l'escalfament global. En definitiva, són símptomes evidents del que anomenem *canvi climàtic*.

No cal dir que uns canvis tan evidents en l'arribada de l'energia que descarrega sobre les platges n'afecta clarament l'estabilitat i provoca els problemes d'erosió que totes les platges metropolitanas estan evidenciant en els darrers anys.