



**Escola de Camins**

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports  
UPC BARCELONATECH

## Anàlisi de la incertesa en les prediccions morfodinàmiques

Treball realitzat per:

**Xavier Artola Segalés**

Dirigit per:

**Vicenç Gracia García**

**Manel García León**

Grau en:

**Enginyeria Civil**

Barcelona, **Setembre 2016**

Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental

**TREBALL FINAL DE GRAU**



## ÍNDIX

<b>1. INTRODUCCIÓ</b> .....	4
<b>2. MODEL D'ONATGE. SWASH</b> .....	6
<b>3.METODOLOGIA</b>	
3.1. Àrea d'estudi.....	7
3.2 SWASH a la zona d'estudi .....	10
3.3 Clima de la zona.....	11
3.4 Batimetries	
3.4.1 Model de Wright and Short.....	12
3.4.2 Estat morfodinàmic de la zona estudiada .....	13
3.4.3 Batimetries estudiades.....	14
3.5 Onatges analitzats.....	21
3.6 Sobreelevacions.....	21
3.7 Cabals d'ultrapassament .....	24
3.8 Resum.....	26
<b>4. RESULTATS</b>	
4.1 Direcció Est.....	27
4.2 Direcció Est-sud-est .....	31
4.3 Direcció Sud-est .....	34
<b>5. DISCUSSIÓ DE RESULTATS</b> .....	38
<b>6. CONCLUSIONS I FUTURS DESENVOLUPAMENTS</b> .....	40
<b>7. REFERÈNCIES</b> .....	42
<b>ANNEX I. Taules de resultats</b>	
<b>ANNEX II. Gràfiques comparatives</b>	

## Llistat de taules

Taula 1. Histograma del paràmetre de Dean entre 1958 i 2016.....	13
Taula 2. Histogrames del paràmetre de Dean segons les estacions, entre 1958 i 2016 .....	14
Taula 3. Condicions d'onatge per als casos d'estudi.....	21
Taula 4. Augment global mig de temperatura i de nivell del mar (Font: Fifth Assessment Report AR5, IPCC, 2013) .....	22
Taula 6. Escala de colors segons l'interval d'ultrapassament.....	25
Taula 5. Llindars d'ultrapassament de l'EurOtop .....	25
Taula 7. Resum dels casos d'estudi .....	26

## Llistat de figures

Figura 1. Recorregut de la línia R1 de Renfe .....	4
Figura 2. Ultrapassament a les vies ferroviàries a la costa del Maresme. (Font: El Periódico).....	5
Figura 3. Localització de la zona d'estudi a la costa catalana .....	7
Figura 4. Detall de l'àrea d'estudi.....	7
Figura 5. Separació de les platges del Tram 11 a la zona d'estudi.....	8
Figura 6. Perfil de la Platja de Ponent de Premià.....	8
Figura 7. Perfil de la Platja de la Descàrrega.....	8
Figura 8. Perfil de la Platja del Pla de l'Ós.....	9
Figura 9. Exemple de situació on l'aigua ha arribat al passeig i les vies a la Platja del Pla de l'Ós (Font: Google Earth).....	9
Figura 10. Posició de les boies numèriques d'anàlisi d'ultrapassament en la zona d'estudi. ....	10
Figura 11. Rosa d'onatge de la boia de Barcelona (punt SIMAR). Dades de l'interval 2004-2015 (Font: Puertos del Estado).....	11
Figura 12. Nivell del mar al mareògraf de Barcelona. Dades dels anys 2000-2016. (Font: Puertos del Estado) .....	11
Figura 13. Model Wright and Short per l'estat morfodinàmic de platges de sorra (Font: Australian Beach Systems - Nature and Distribution) .....	12
Figura 14. Malla batimètrica 1 (original). Font: elaboració amb Surfer .....	15
Figura 15. Imatge de la batimetria 1 amb perfil central marcat. Font: elaboració amb Surfer. ....	15
Figura 16. Perfil central de la batimetria 1. ....	16
Figura 17. Malla batimètrica 2. Font: elaboració amb Surfer .....	16
Figura 18. Imatge de la batimetria 2 amb perfil central marcat. Font: elaboració amb Surfer. ....	17
Figura 19. Perfil central de la batimetria 2. ....	17
Figura 20. Malla batimètrica 3. Font: elaboració amb Surfer .....	18
Figura 21. Imatge de la batimetria 3 amb perfil central marcat. Font: elaboració amb Surfer. ....	18
Figura 22. Perfil central de la batimetria 3. ....	19
Figura 23. Malla batimètrica 4. Font: elaboració amb Surfer .....	19
Figura 24. Imatge de la batimetria 4. Font: elaboració amb Surfer.....	20
Figura 25. Perfil central de la batimetria 4. ....	20
Figura 26. Concentracions atmosfèriques de CO <sub>2</sub> -equivalent de tots els agents segons els els escenaris RCP. (Font: Wikipedia, Representative Concentration Pathways).....	22
Figura 27. Resultats d'ultrapassament temporals en la boia P5 per al temporal de l'Est, Tr=50 anys, sobrelevació 0,62m.....	24
Figura 28. Gràfic comparatiu de $q_{mean}$ (l/s/m) per a la direcció Est, sobrelevació 0.2m, Tr=50anys... 27	
Figura 29. Gràfic comparatiu de $q_{mean}$ (l/s/m) per a la direcció Est, sobrelevació 0.62m, Tr=5anys... 28	

Figura 30. Gràfic comparatiu de $q_{mean}$ (l/s/m) per a la direcció Est, sobrelevació 0.62m, $Tr=10$ anys.	29
Figura 31. Gràfic comparatiu de $q_{mean}$ (l/s/m) per a la direcció Est, sobrelevació 0.62m, $Tr=50$ anys.	29
Figura 32. Gràfic comparatiu de $q_{mean}$ (l/s/m) per a la direcció Est, sobrelevació 0.88m, $Tr=10$ anys.	30
Figura 33. Gràfic comparatiu de $q_{mean}$ (l/s/m) per a la direcció Est, sobrelevació 1.2m, $Tr=10$ anys.	30
Figura 34. Gràfic comparatiu de $q_{mean}$ (l/s/m) per a la direcció Est, sobrelevació 1.8m, $Tr=5$ anys.	31
Figura 35. Gràfic comparatiu de $q_{mean}$ (l/s/m) per a la direcció Est-sud-est, sobrelevació 0.62m, $Tr=10$ anys.	32
Figura 36. Gràfic comparatiu de $q_{mean}$ (l/s/m) per a la direcció Est-sud-est, sobrelevació 0.62m, $Tr=50$ anys.	33
Figura 37. Gràfic comparatiu de $q_{mean}$ (l/s/m) per a la direcció Est-sud-est, sobrelevació 0.88m, $Tr=5$ anys.	33
Figura 38. Gràfic comparatiu de $q_{mean}$ (l/s/m) per a la direcció Est-sud-est, sobrelevació 1.2m, $Tr=10$ anys.	34
Figura 39. Gràfic comparatiu de $q_{mean}$ (l/s/m) per a la direcció Est-sud-est, sobrelevació 1.8m, $Tr=50$ anys.	34
Figura 40. Gràfic comparatiu de $q_{mean}$ (l/s/m) per a la direcció Sud-est, sobrelevació 0.62m, $Tr=50$ anys.	35
Figura 41. Gràfic comparatiu de $q_{mean}$ (l/s/m) per a la direcció Sud-est, sobrelevació 0.88m, $Tr=10$ anys.	35
Figura 42. Gràfic comparatiu de $q_{mean}$ (l/s/m) per a la direcció Sud-est, sobrelevació 0.88m, $Tr=50$ anys.	36
Figura 43. Gràfic comparatiu de $q_{mean}$ (l/s/m) per a la direcció Sud-est, sobrelevació 1.2m, $Tr=5$ anys.	36
Figura 44. Gràfic comparatiu de $q_{mean}$ (l/s/m) per a la direcció Sud-est, sobrelevació 1.8m, $Tr=10$ anys.	37



Aquestes situacions són les que van impulsar l'estudi de la zona per avaluar l'efecte dels temporals i del ultrapassament en les vies, per determinar quin tipus d'afectació patiria la via i els perills de la situació. En l'estudi anterior, es va afegir el component de la pujada del nivell del mar per efectes del canvi climàtic, per fer una previsió de futur. L'efecte del canvi climàtic és un component a llarg termini dels agents impulsors, que afectarà de forma significativa la costa catalana (Sánchez-Arcilla et al., 2016a; Sánchez-Arcilla et al., 2016b; Sierra and Casas-Prat, 2014). En aquest estudi, s'ha considerat l'efecte del canvi climàtic a partir de projeccions de pujada del nivell del mar, principal factor en possibles increments d'ultrapassament (Sierra et al., 2016).



Figura 2. Ultrapassament a les vies ferroviàries a la costa del Maresme. (Font: El Periódico)

Així doncs, aquest conjunt d'escenaris seran utilitzats per poder observar en un cas pràctic quines són les variacions dels resultats i de la perillositat en situacions en que la batimetria és modificada respecte la original. Es realitzaran variacions a la batimetria original, seguint criteris fonamentats en estats morfodinàmics (Wright and Short, 1984), on s'estudiaran un seguit de casos d'onatges i sobrelevacions del nivell del mar, i es compararan els resultats d'ultrapassament amb aquells que obtenim amb la batimetria original.

## 2. MODEL D'ONATGE. SWASH

El programa SWASH (Simulating WAVes till SHoreline) (Zijlema et al., 2011) és una eina numèrica per a la simulació de fluxos no hidrostàtics, de superfície lliure i rotacionals, en una, dues i tres dimensions. Es troba governat per les equacions de Navier-Stokes en aigües someres. Permet tenir en compte les interaccions no linears entre onades, les interaccions d'onades amb corrents i estructures, i simula acuradament el trencament d'ona i el *runup* generat a la costa.

Aquest model és conegut com un model de flux d'ones, aplicable bàsicament a les zones costeres fins a la vora de l'aigua. Això permet utilitzar aquesta eina en zones de petita escala tals com l'onatge a la platja, agitació d'onatge en ports i similars, que és el que ens interessa a nosaltres.

Una de les característiques més importants és que està basat en un mètode explícit de diferències finites de segon ordre, en que es conserva la massa i la quantitat de moviment (Zijlema and Stelling, 2008). Aquesta característica permet modelar acuradament el trencament d'ona i la propagació i evolució de les onades després del trencament, que en aigües someres i sobretot en el cas que estudiem, és molt important per a la dissipació de l'energia, factor que condiciona en gran mesura l'extensió i magnitud de zona inundada.

Tal com es troba exposat al manual de l'usuari de SWASH, el programa té en compte els següents fenòmens físics:

- Propagació d'onades, dispersió de la freqüència, *shoaling*, refracció i difracció.
- Interacció no linear entre onades.
- Trencament d'ona.
- *Runup* i *rundown* de les onades.
- Línia de costa en moviment.
- Fricció amb el fons.
- Reflexió parcial d'onades i transmissió.
- Interacció d'ones amb estructures.
- Interacció d'ones amb els corrents d'aigua.
- Corrents induïts per l'onatge.
- Turbulències verticals.
- Amortiment de les ones a causa de vegetació aquàtica.
- Variació ràpida dels fluxos.
- Onades generades per marea.
- *bores and flood waves*
- Fluxos afectats pel vent.
- Variació espacial del vent i la pressió atmosfèrica.
- Fluxos causats per diferències de densitat.
- Fluxos turbulents.

S'ha comprovat que SWASH reproduceix les característiques principals de la dinàmica a la *surf zone* (zona de trencament de les ones i posterior). Es considera que el model que utilitza el programa és prou robust i eficient per a ser un model fiable.

Cal comentar, però, que el programa no té en compte una variació del fons durant la simulació. És a dir, la forma del fons romandrà constant independentment de la mida del gra.



### 3.METODOLOGIA

#### 3.1. Àrea d'estudi

L'àrea d'estudi es troba situada entre el Port del Masnou i el Port de Premià, i correspon al tram 11 de la zona costanera catalana, definit al *Llibre verd de l'Estat de la zona costanera a Catalunya, 2010* (CIIRC, 2010) (figura 3).



Figura 3. Localització de la zona d'estudi a la costa catalana

La línia R1 de la Renfe circula en aquell tram de manera paral·lela a la costa, a una distància d'entre 15 i 25 metres de la costa segons el tram. A la zona estudiada, al voltant del quilòmetre K637 (figura 4), la via es troba a uns 1,5m per sobre el nivell del mar.



Figura 4. Detall de l'àrea d'estudi

El tram estudiat tracta de 800m de costa, on s’hi troben la Platja de la Descàrrega (57) al centre, part de la Platja de Ponent de Premià (56), i part de la Platja del Pla de l’Ós (58) (figura 5). L’orientació de la costa és d’uns 70° respecte el nord.



Figura 5. Separació de les platjes del Tram 11 a la zona d'estudi

Per a la descripció completa de la zona s’ha de comentar cada platja, ja que tenen característiques diferents tant de sediment com de perfil. Del *Llibre verd de l’Estat de la zona costanera a Catalunya, 2010* s’ha obtingut la següent informació i perfils (figures 6, 7, 8):

- Platja de Ponent de Premià (56): mida de sediment  $d_{50}=0,578\text{mm}$ ; pendent mig 0,19.
- Platja de la Descàrrega (57): mida de sediment  $d_{50}=0,419\text{mm}$ ; pendent mig 0,08.
- Platja del Pla de l’Ós (58): mida de sediment  $d_{50}=0,343$ ; pendent mig 0,17.

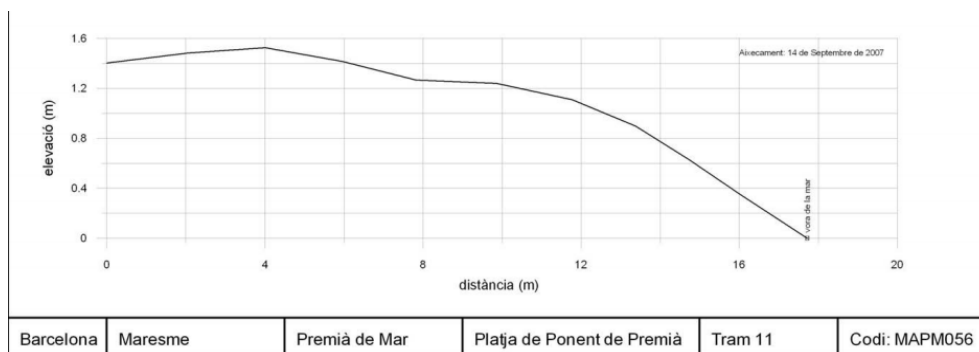


Figura 6. Perfil de la Platja de Ponent de Premià

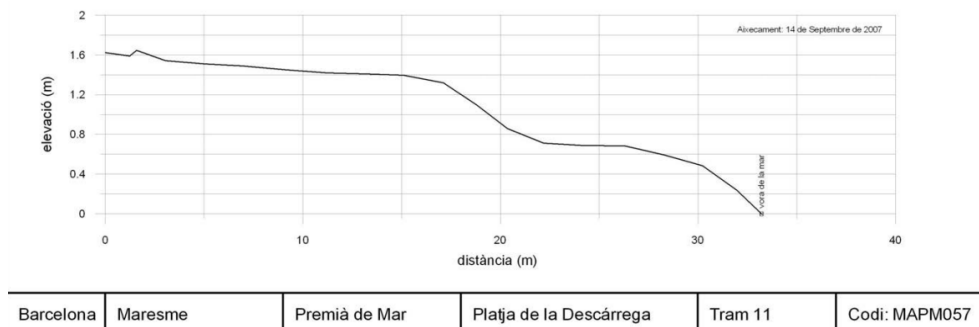


Figura 7. Perfil de la Platja de la Descàrrega

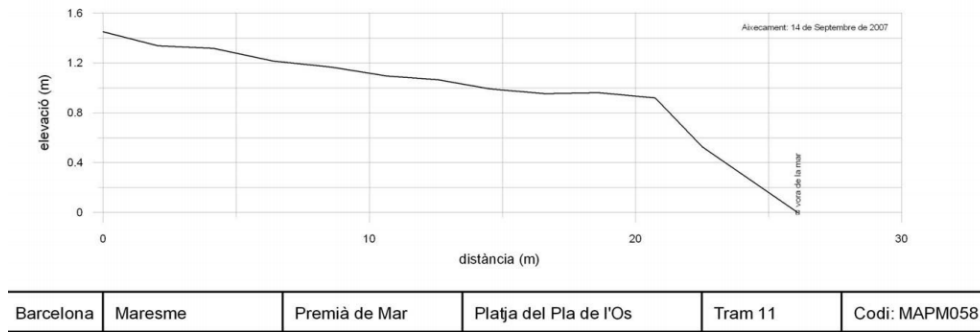


Figura 8. Perfil de la Platja del Pla de l'Ós

La problemàtica actual és que, degut a la proximitat de la protecció d'escullera i de les vies ferroviàries a la vora del mar, i a la poca alçada que es troben respecte el nivell del mar, els fenòmens d'ultrapassament ocasionen conflictes de diverses magnituds. Tal com es pot observar a la imatge de la platja del Pla de l'Ós (figura 9), el passeig es troba mullat degut a les onades.



Figura 9. Exemple de situació on l'aigua ha arribat al passeig i les vies a la Platja del Pla de l'Ós (Font: Google Earth)

L'aigua que arriba al passeig per l'onatge queda allà entollada, dificultant la funcionalitat del passeig. De mateixa manera, quan l'onatge arriba a la via també s'hi queda i pot dificultar la funcionalitat de la via. A més, durant certs episodis de tempesta, la quantitat d'aigua d'ultrapassament que arriba a la via és massa gran com per a permetre l'ús de la mateixa, implicant el servei al públic.

En situacions de tempestes més fortes, la proximitat de les instal·lacions ferroviàries al mar implica que les onades dels temporals poden arribar a danyar seriosament les instal·lacions i el passeig, resultant en un greu cost econòmic a més de bloquejar la funcionalitat completament.

### 3.2 SWASH a la zona d'estudi

Cal esmentar que les bases de l'ús de SWASH han estat determinades per l'anterior estudi d'aquesta zona (Salas, 2015). D'aquell estudi se'n va obtenir també la boia numèrica d'onatge, generada pel programa SWAN (Simulating WAVes Nearshore), que s'introdueix al programa per a la simulació, així com les característiques de l'onatge estudiat.

Per a l'ús del programa SWASH s'ha emprat una malla regular de 800m x 800m, amb un espaïament de 4m entre punts, des d'uns 4m per sobre el nivell del mar fins a les profunditats al voltant de 9m. Els eixos de la malla es troben rotats per tal que la costa es trobi al contorn superior de la malla, ja que la costa té una inclinació original d'uns 70° respecte el nord.

En aquesta situació, s'avaluaran les descàrregues d'ultrapassament en sis punts a la cota aproximada 1m per sobre el nivell del mar, utilitzant boies numèriques per a fer la funció. Les boies es situen on es mostra a la *figura 10*: P1(445642, 4592913), P2(445745, 4592942), P3(445867, 4592985), P4(445969, 4593021), P5(446089, 4593060) i P6(446222, 4593114).

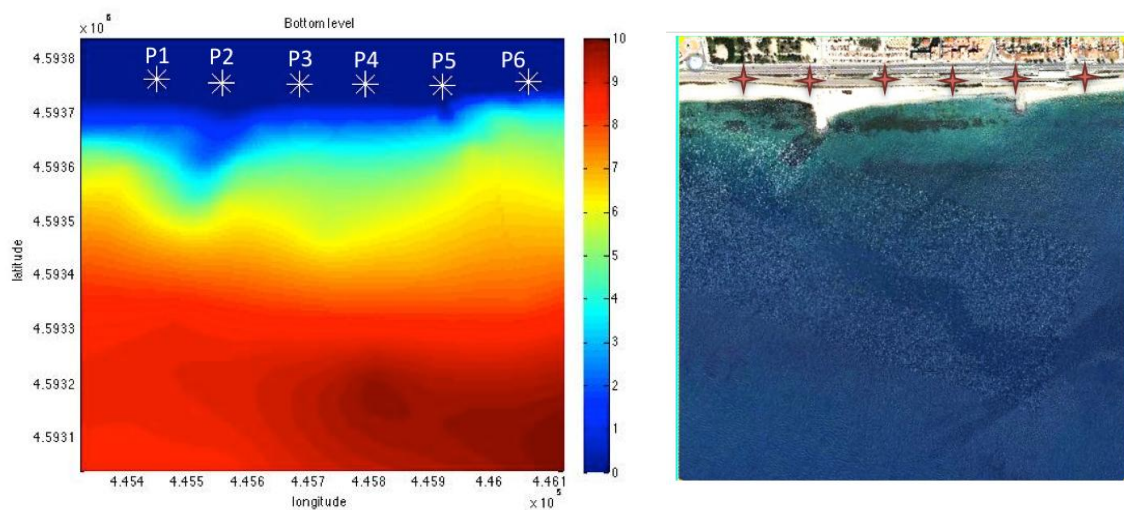


Figura 10. Posició de les boies numèriques d'anàlisi d'ultrapassament en la zona d'estudi.

S'introdueixen les dades d'onatge pel contorn inferior de la malla, definint la resta com a contorns de radiació, i afegint esponges als marges superior i esquerra (ja que són els que reben les onades) per assegurar que l'energia reflectada no introdueixi ones falses que contaminin la propagació. Es considerarà fricció de Manning i viscositat horitzontal del model de Smagorinsky.

S'efectuarà una simulació d'una hora, en representació del pic del temporal. Els primers 5 minuts no es tindran en compte per tal de permetre el front d'ones inicial arribar a la costa amb la finalitat d'evitar discontinuïtats en la solució donat el 'warm-up' del model

### 3.3 Clima de la zona

Com la zona d'estudi es troba prou propera a Barcelona, s'utilitzarà la boia de Barcelona per definir les característiques d'onatge i elevació del mar de la nostra àrea. Com es pot veure a la rosa d'onatge (figura 11), les direccions més comunes de tempesta són les que provenen de les direccions est (E), est-sud-est (ESE) i sud-est (SE).

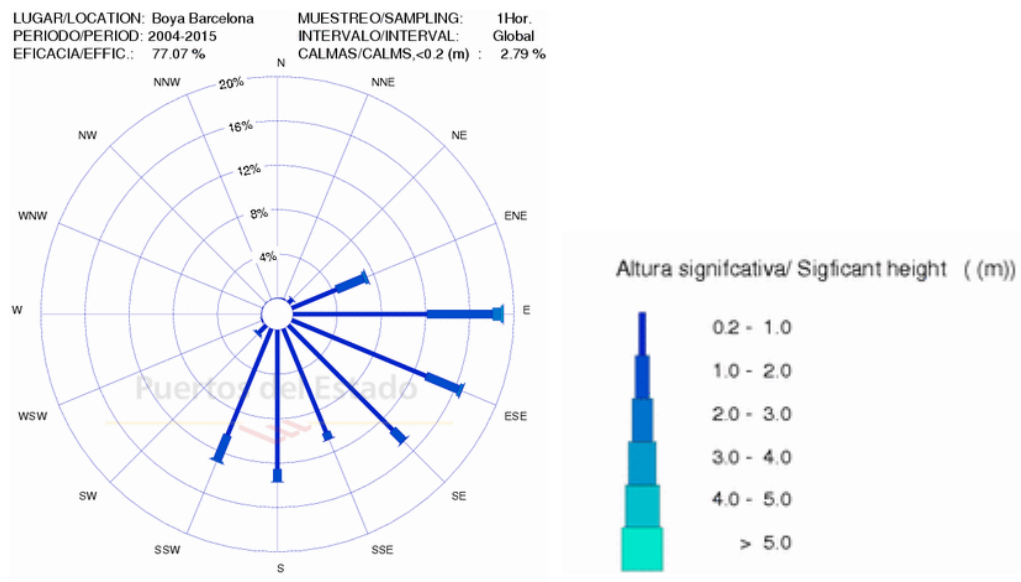


Figura 11. Rosa d'onatge de la boia de Barcelona (punt SIMAR). Dades de l'interval 2004-2015 (Font:Puertos del Estado)

Per a la consideració del nivell del mar, utilitzarem també les dades de Barcelona, aquest cop del mareògraf de Barcelona (REDMAR). Tal com podem observar a les dades del mareògraf (figura 12), hi ha un nivell del mar d'uns 0,3m per sobre el zero del port, amb una marea màxima pleamar astronòmica de 0,5m. És a dir, una marea màxima de 0,2m, pertanyent a un ambient de tipus micromareal (Davies, 1964)

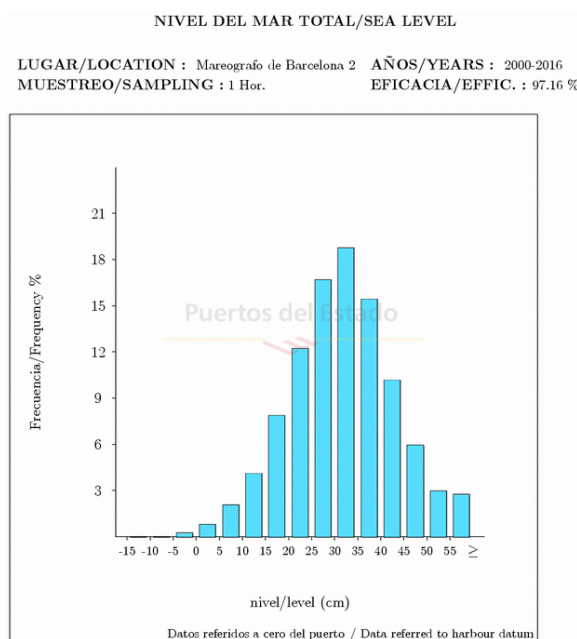


Figura 12. Nivell del mar al mareògraf de Barcelona. Dades dels anys 2000-2016. (Font: Puertos del Estado)

### 3.4 Batimetries

L'objectiu principal d'aquest estudi és analitzar com varien els resultats d'ultrapassament quan hi ha modificacions a la batimetria original. Aquests canvis han de ser conseqüents a l'estat i característiques morfodinàmiques de la zona. El model de (Wright and Short, 1984), descrit en aquest capítol, defineix una sèrie configuracions plausibles del fons a baixes profunditats.

#### 3.4.1 Model de Wright and Short (1984)

El model de Wright and Short, també conegut com a "Australian Beach Model", va sorgir de la necessitat d'estudiar el comportament de les platges sorrenques australianes. Es tracta d'un model per a platges de sorra que tenen un comportament dominat per les onades i no per les mareas (i.e. condicions anàlogues a la nostra zona d'estudi).

Aquest model determina que l'estat morfodinàmic de les platges de sorra, és a dir, el perfil que adquireix la zona de vora l'aigua i el fons marí proper a la costa, és funció de certs paràmetres de les onades incidents i de la mida de gra de la sorra de la platja.

Wright and Short van identificar els extrems d'aquest estat morfodinàmic com a estat dissipatiu i estat reflectiu, amb quatre estats intermedis. A la figura 13 podem apreciar una indicació general de les característiques d'aquests estats.

En base a moltes observacions a les platges, Wright i Short van concloure que el seu estat depèn principalment de l'alçada de trencament d'ona, el període d'ona, i la mida del sediment. Així doncs, van utilitzar l'anomenat paràmetre de Dean ( $\Omega$ ) per identificar l'estat de la platja.

$$\Omega = \frac{H_b}{\omega_s * T}$$

En que  $H_b$  = alçada de trencament d'ona,  $\omega_s$  = velocitat de caiguda del sediment, i  $T$  = període d'ona. Amb aquest paràmetre, en surt la següent classificació:

- $0 < \Omega \leq 1$ : estat reflectiu
- $1 < \Omega < 6$ : estat intermedi
- $6 \leq \Omega$ : estat dissipatiu

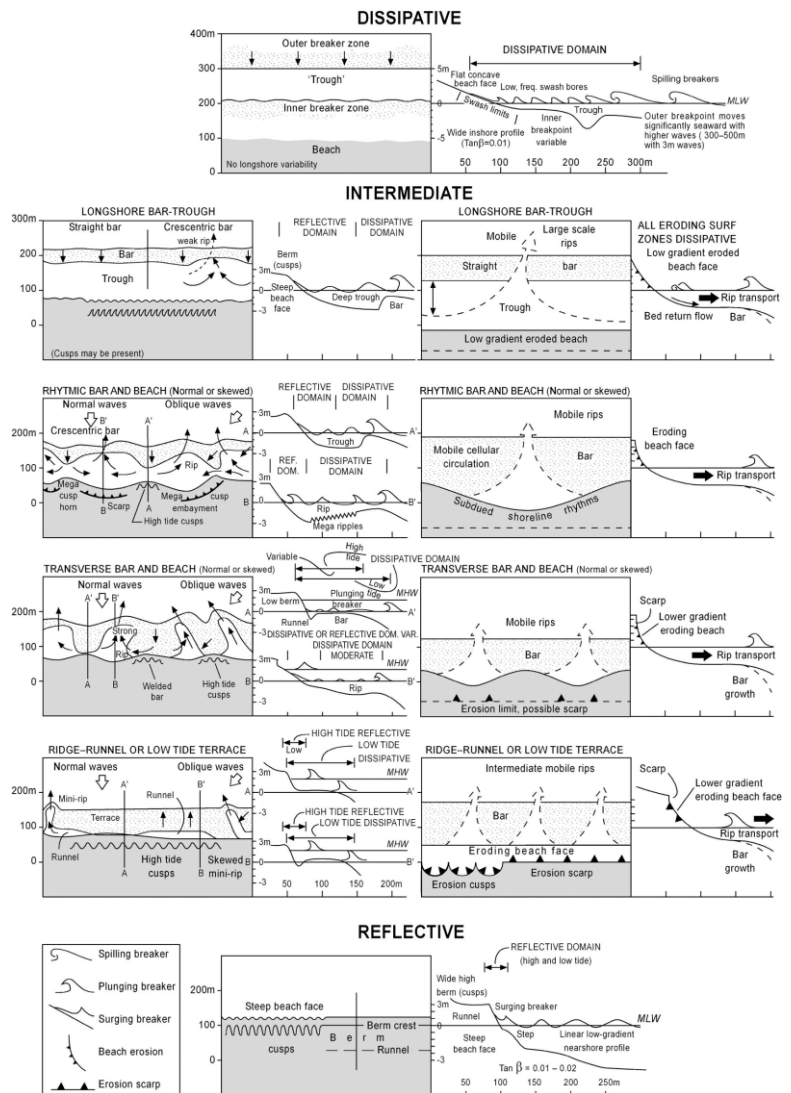


Figura 13. Model Wright and Short per l'estat morfodinàmic de platges de sorra (Font: Australian Beach Systems - Nature and Distribution)

Totes les platges es troben en constant canvi d'estat degut a l'acció de les onades i a l'efecte de les mareas, dificultant la hipòtesi de que una platja es trobi sempre en un estat determinat. Aquests canvis poden resultar de canvis bruscos, com un fort temporal que modifiqui la batimetria de la zona d'estat reflectiu a un estat dissipatiu, però tarda bastant temps en tornar a l'estat reflectiu, ja que ho fa degut a la incidència d'onades més habituals i menys fortes.

Tot i així, degut a la regularitat del clima en una zona, es pot dir que una certa platja té més tendència a trobar-se en un cert estat, és a dir, que la major part del temps es caracteritza per tenir un cert paràmetre de Dean o similars.

### 3.4.2 Estat morfodinàmic de la zona estudiada

Tal com s'ha comentat, per a conèixer quins són els estats morfodinàmics més comuns a la zona estudiada, hem d'avaluar el seu paràmetre de Dean i com evoluciona. Per a fer això, s'han utilitzat les dades d'onatge recollides per una estació SIMAR propera en aigües profundes des de 1958 fins a 2016, i s'han propagat mitjançant teoria lineal a la nostra platja d'estudi. D'aquí se n'ha obtingut l'alçada de trencament d'ona i el seu període. Per a la velocitat de caiguda del sediment, s'ha utilitzat la mida de sediment de la Platja de la Descàrrega, ja que és la que nosaltres estudiem del tot, que té un  $d_{50}=0.419\text{mm}$ .

Realitzant un histograma amb totes les dades disponibles, s'ha obtingut la freqüència de l'estat morfodinàmic de la platja (*taula 1*).

Taula 1. Histograma del paràmetre de Dean entre 1958 i 2016

Paràmetre de Dean ( $\Omega$ )	Freqüència	% del total
0-1	205362	40,27
1-2	213326	41,83
2-3	72454	14,21
3-4	14898	2,92
4-5	3365	0,66
5-6	498	0,1
>6	46	0,01

Com podem observar, hi ha una clara tendència a tractar-se d'una platja reflectiva i intermèdia de baix paràmetre de Dean. Això és degut a que no es tracta d'una zona on hi hagi forts temporals de manera regular, i hi ha una mida de sediment relativament gruixuda, el que impedeix que es modifiqui tant la batimetria al ser afectada per tempestes.

També s'han realitzat histogrames corresponents a les diferents estacions de l'any, per estudiar la tendència en diverses èpoques i observar si hi havia una gran variació (*taula 2*). S'han dividit les dades en primavera (Març-Maig), estiu (Juny-Agost), tardor (Setembre-Novembre) i hivern (Desembre-Febrer).

Taula 2. Histogrames del paràmetre de Dean segons les estacions, entre 1958 i 2016

Primavera			Estiu		
Paràmetre de Dean ( $\Omega$ )	Freqüència	%	Paràmetre de Dean ( $\Omega$ )	Freqüència	%
0-1	47164	36.29	0-1	45852	35.77
1-2	57338	44.12	1-2	65453	51.07
2-3	20426	15.72	2-3	16062	12.53
3-4	4045	3.11	3-4	775	0.60
4-5	835	0.64	4-5	24	0.02
5-6	152	0.12	5-6	2	0.00
>6	6	0.00	>6	1	0.00

Tardor			Hivern		
Paràmetre de Dean ( $\Omega$ )	Freqüència	%	Paràmetre de Dean ( $\Omega$ )	Freqüència	%
0-1	53823	42.59	0-1	58523	46.65
1-2	48148	38.10	1-2	42387	33.79
2-3	18397	14.56	2-3	17569	14.01
3-4	4659	3.69	3-4	5419	4.32
4-5	1181	0.93	4-5	1325	1.06
5-6	147	0.12	5-6	197	0.16
>6	21	0.02	>6	18	0.01

Es pot veure que, durant la primavera i estiu, hi ha una major tendència a un paràmetre de Dean d'entre 1 i 2, el que vol dir que l'onatge és regularment d'alçada una mica superior al de tardor i hivern. A més, podem observar que a l'estiu hi ha molt poca varietat i quasi no hi ha ocasions en que el paràmetre de Dean augmenti, mentre a les altres estacions sí que succeeix. A part d'aquestes lleugeres consideracions, no s'aprecien grans canvis de règim estacional en les característiques de la platja. Aquests resultats coincideixen amb l'estat de l'art en la zona d'estudi (Bolanos et al., 2009; Lin-Ye et al., 2016).

### 3.4.3 Batimetries estudiades

Les malles de la batimetria seran creades amb el programa comercial Surfer, partint d'una batimetria original i aplicant-hi modificacions per cobrir diversos possibles casos, basats en el model de (Wright and Short, 1984). S'introduiran aleshores al programa SWASH, i s'observaran les diferències de resultats d'ultrapassament a les boies numèriques entre batimetries diferents. Les imatges de les batimetries estan generades també amb Surfer, per poder veure les diferències d'una manera senzilla. També es mostrarà un perfil de cada batimetria, marcat a la imatge corresponent, i es marcarà al perfil el punt de cota 0.

Tal com es veu a l'apartat anterior, la nostra platja normalment està dintre d'un estat reflectiu. Aquest estat correspon al paràmetre de Dean entre 0 i 1, i l'associarem a la batimetria original, sense cap modificació, donat que s'ajusta adequadament al que observem a la *figura 13* del model de Wright and Short.



- Batimetria 1 (original): Malla batimètrica 1 (*figura 14*), imatge de la batimetria 1 (*figura 15*) i perfil del centre de la batimetria 1 (*figura 16*).

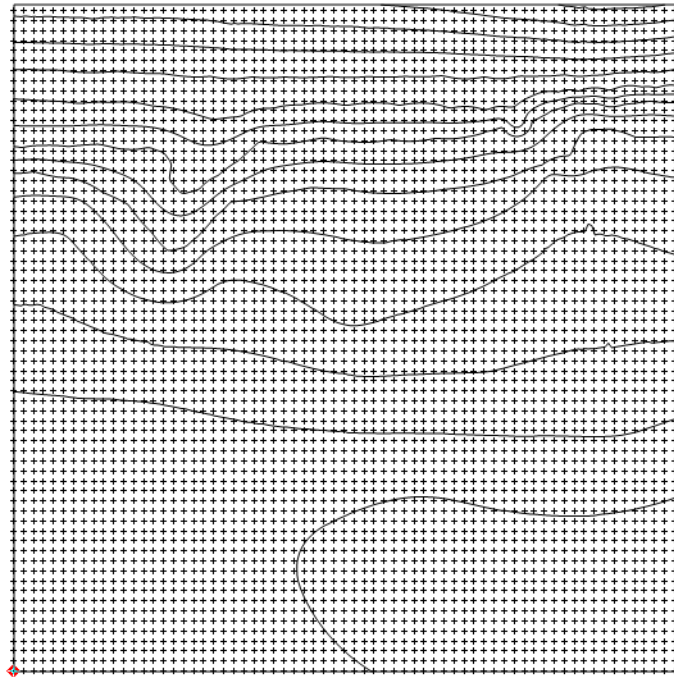


Figura 14. Malla batimètrica 1 (original). Font: elaboració amb Surfer

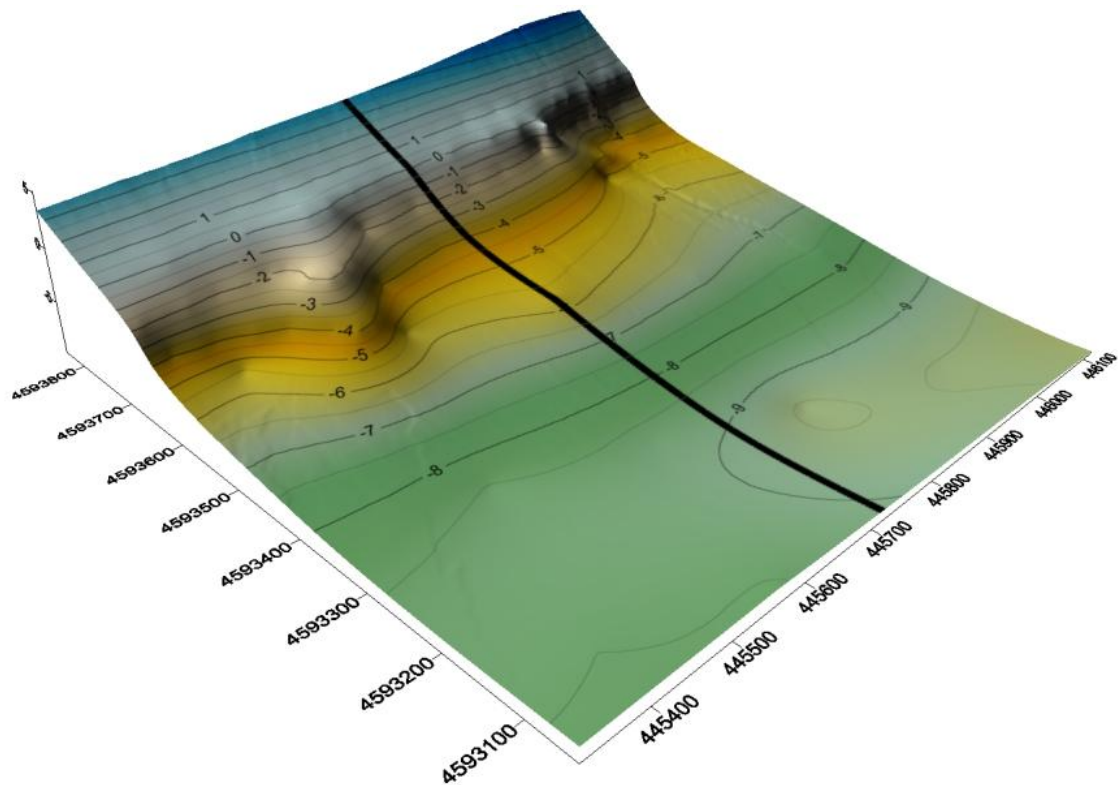


Figura 15. Imatge de la batimetria 1 amb perfil central marcat. Font: elaboració amb Surfer.

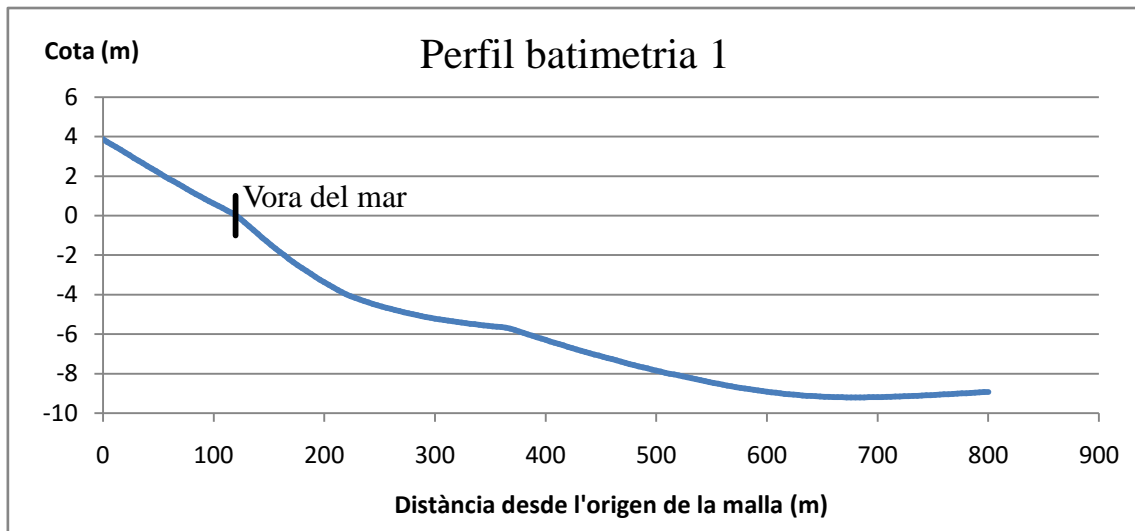


Figura 16. Perfil central de la batimetria 1.

Així doncs, les modificacions a la batimetria es faran tenint en compte característiques que s'assemblin a les de la *figura 13* segons el paràmetre de Dean.

- Batimetria 2: com també és un valor molt comú, considerant un paràmetre de Dean d'aproximadament 2, afegirem a la batimetria original una petita terrassa formada per una barra de sorra entre les cotes -0.5 i -2. Malla batimètrica 2 (*figura 17*), imatge de la batimetria 2 (*figura 18*) i perfil del centre de la batimetria 2 (*figura 19*).

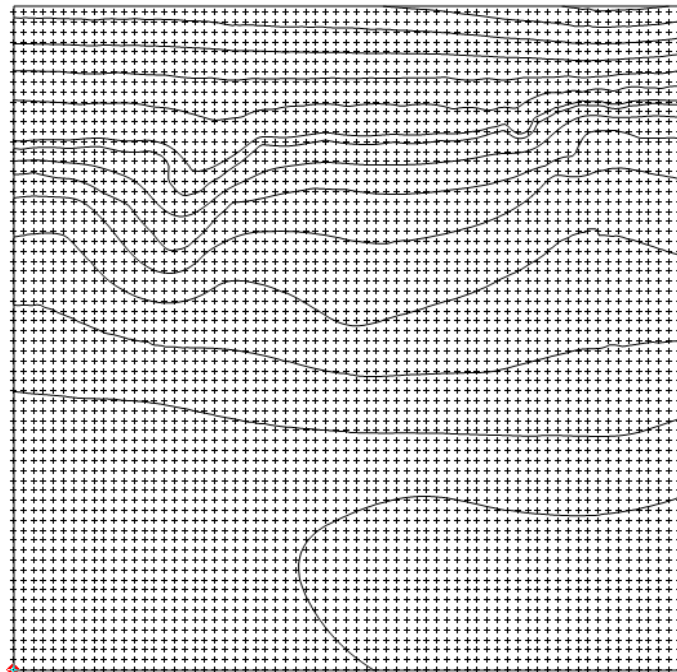


Figura 17. Malla batimètrica 2. Font: elaboració amb Surfer

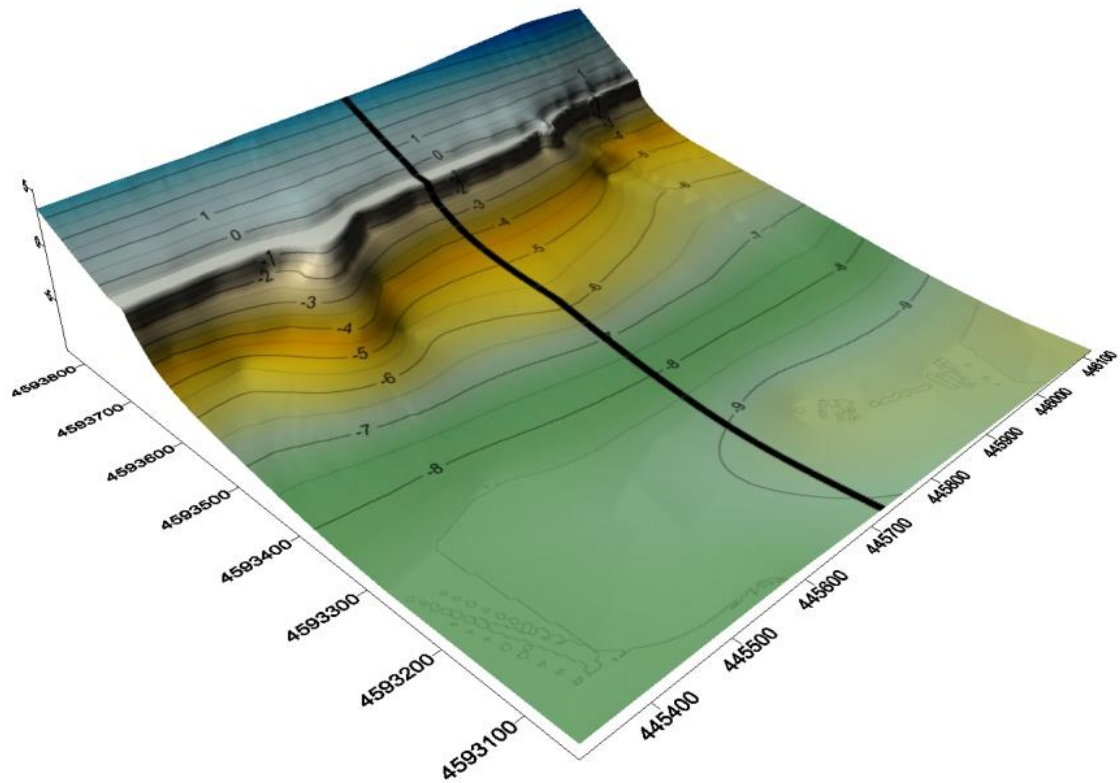


Figura 18. Imatge de la batimetria 2 amb perfil central marcat. Font: elaboració amb Surfer.

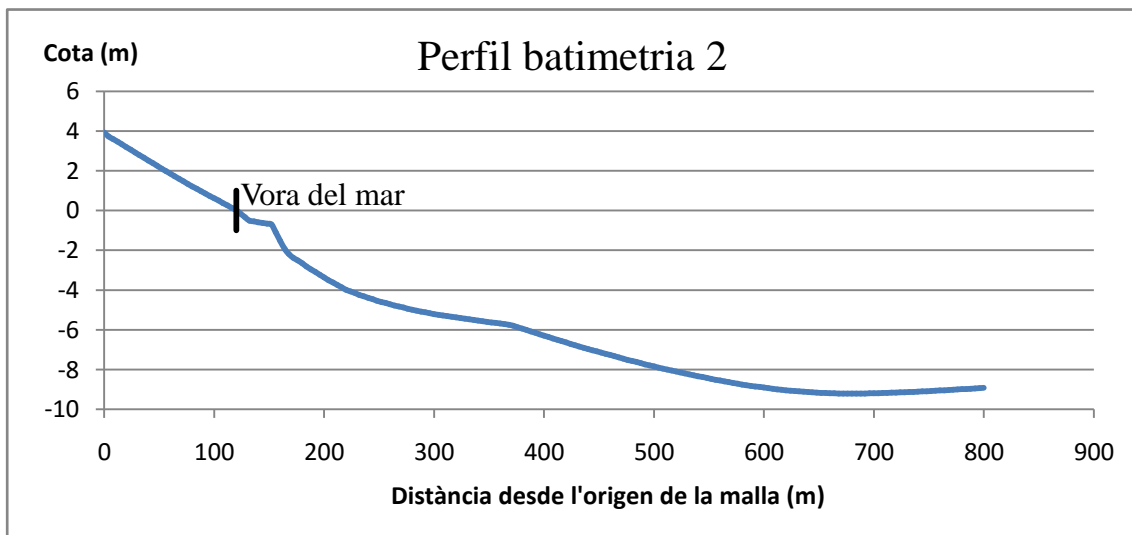


Figura 19. Perfil central de la batimetria 2.

- Batimetria 3: per a considerar també l'altre extrem dels estats morfodinàmics, considerarem un paràmetre de Dean d'aproximadament 6, tot i que com podem veure no és gaire comú, però és possible. En aquesta batimetria, afegirem un canal d'uns 2m de profunditat i uns 50m d'amplada a una distancia aproximada de 100m de la vora del mar, que correspon als voltants de la cota -4. Malla batimètrica 3 (figura 20), imatge de la batimetria 3 (figura 21) i perfil del centre de la batimetria 3 (figura 22).

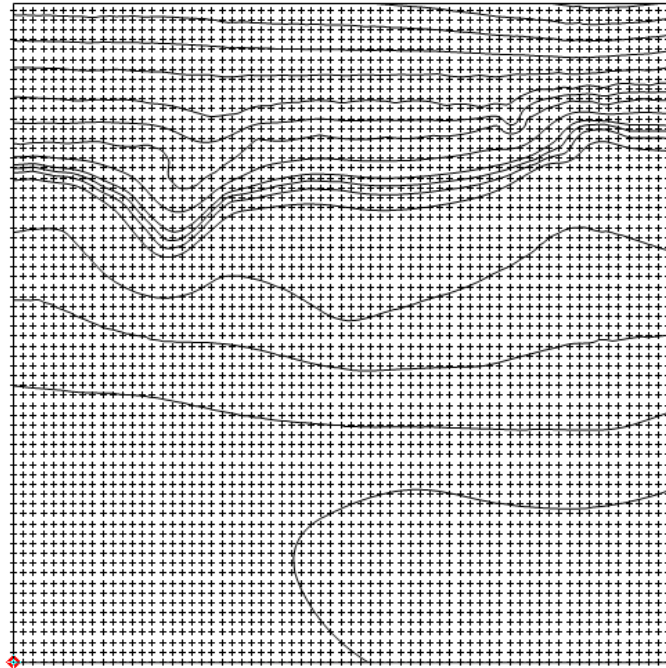


Figura 20. Malla batimètrica 3. Font: elaboració amb Surfer

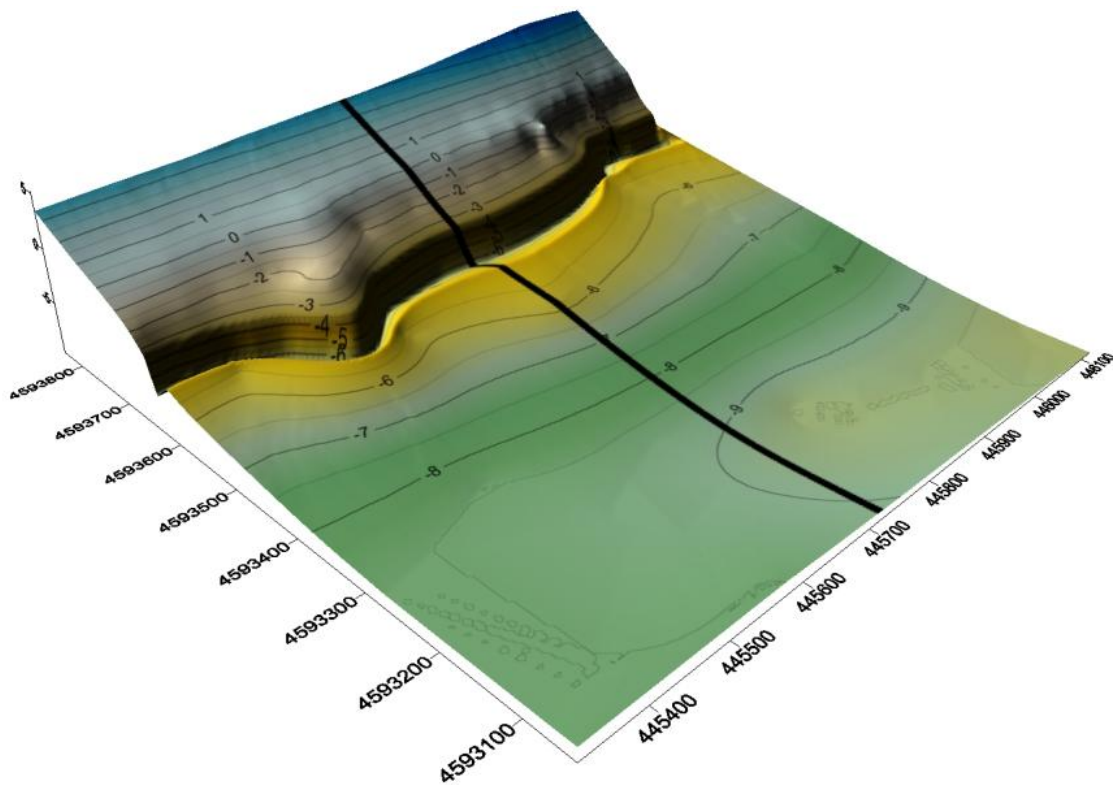


Figura 21. Imatge de la batimetria 3 amb perfil central marcat. Font: elaboració amb Surfer.

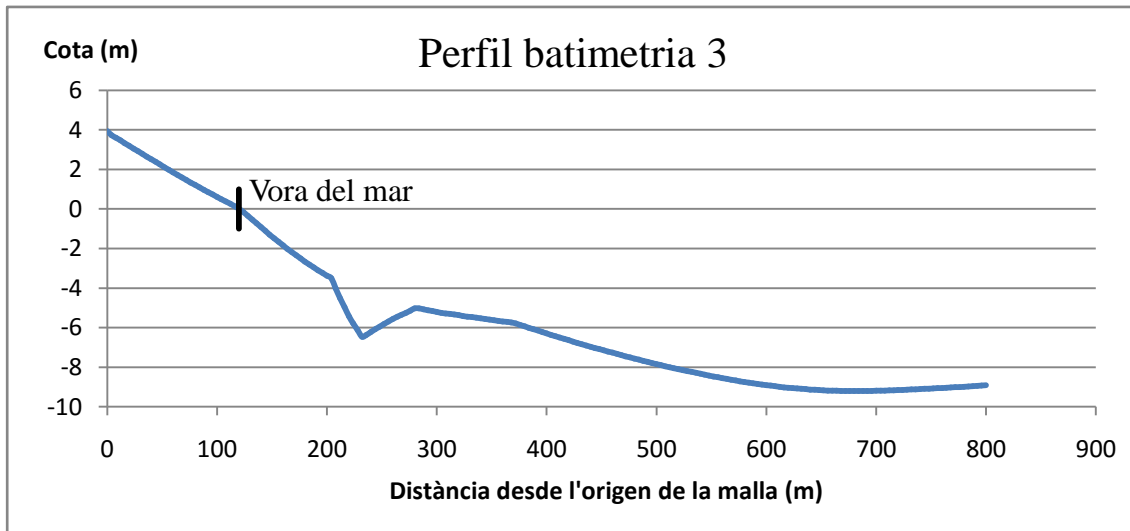


Figura 22. Perfil central de la batimetria 3.

- Batimetria 4: s'ha considerat interessant considerar casos en que hi hagués una modificació artificial, en la que, ja d'entrada, esperem una variació major. Per a això s'ha fet un cas en que la batimetria, en comptes de tenir un canal, tingués algun tipus d'alimentació artificial o de dic submergit per a protegir de les onades, i estudiar quins resultats s'obtenen. Es tracta bàsicament d'una gran barra de sorra submergida. En aquest cas s'ha afegit una elevació del terreny d'uns 2m respecte l'original, a una distància d'uns 100m de la vora del mar. Malla batimètrica 4 (figura 23), imatge de la batimetria 4 (figura 24) i perfil del centre de la batimetria 4 (figura 25).

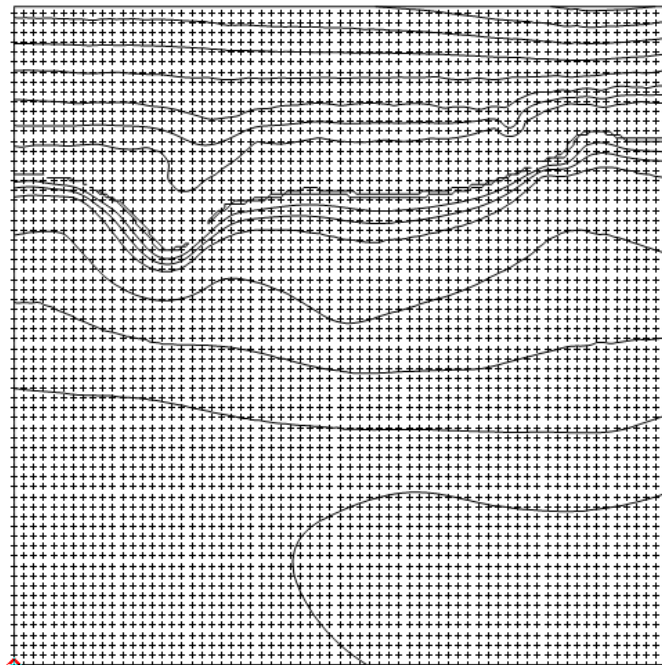


Figura 23. Malla batimètrica 4. Font: elaboració amb Surfer

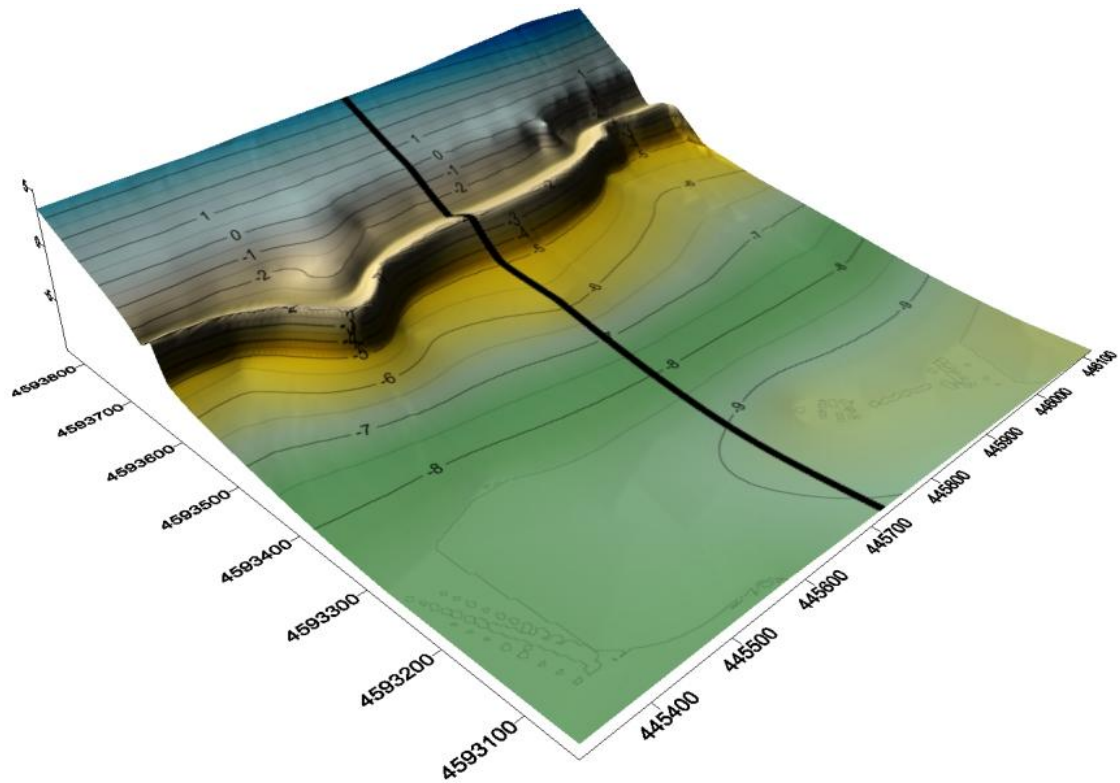


Figura 24. Imatge de la batimetria 4. Font: elaboració amb Surfer.

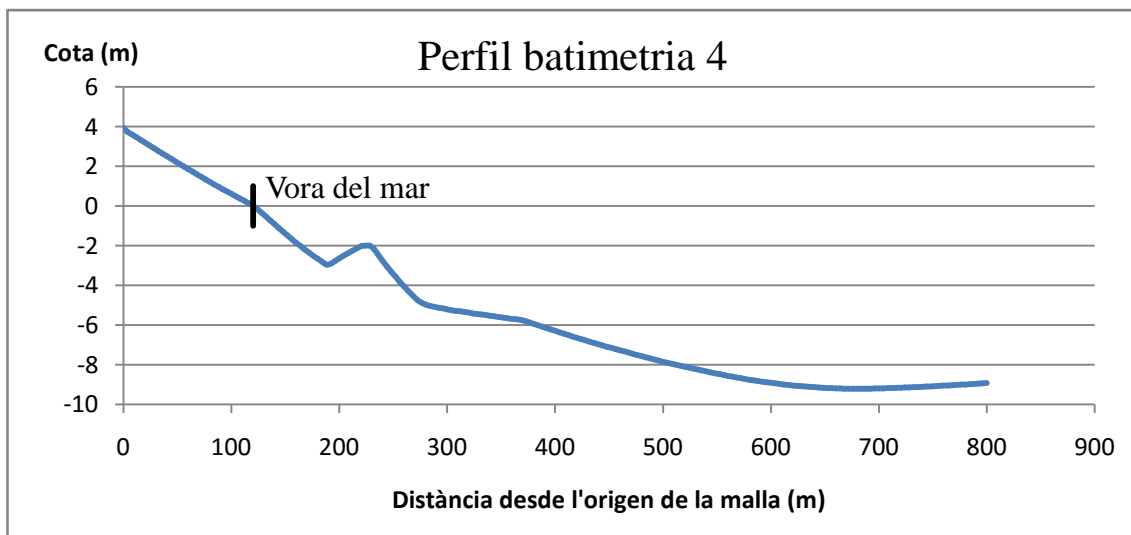


Figura 25. Perfil central de la batimetria 4.

### 3.5 Onatges analitzats

Tal com hem vist a l'apartat del clima de la zona, les direccions predominants d'onatge i tempesta són les d'Est (E), Est-Sud-Est (ESE) i Sud-Est (SE) (Bolanos et al., 2009; Lin-Ye et al., 2016). Així doncs, aquestes tres direccions seran les que utilitzarem per al nostre estudi. La direcció Est, tot i ser la més obliqua a la costa, és la de major alçada d'onatge i de la que s'espera major perillositat.

Volem estudiar situacions de tempesta, però tampoc volem únicament tenir dades poc comunes, així que estudiarem tres casos de tempesta en funció del seu període de retorn:  $Tr=5$  anys,  $Tr=10$  anys i  $Tr=50$  anys. Aquests onatges corresponen a les altures significatives i períodes de pic mostrades a la *taula 3*.

Taula 3. Condicions d'onatge per als casos d'estudi

	Direcció E	Direcció ESE	Direcció SE
Tr=5 anys	Hs=3.45m Tp=8.794s	Hs=2.4495m Tp=7.564s	Hs=1.6215m Tp=6.309s
Tr=10 anys	Hs=4.34m Tp=9.729s	Hs=3.0814m Tp=8.368s	Hs=2.0398m Tp=6.979s
Tr=50 anys	Hs=5.57m Tp=10.858s	Hs=3.9547m Tp=9.339s	Hs=2.6179m Tp=7.789s

### 3.6 Sobreelevacions

Per poder estudiar com afecten els efectes del canvi climàtic a la nostra situació, caldrà justificar les sobreelevacions que utilitzarem per el nostre estudi.

Les projeccions dels efectes del canvi climàtic en la pujada del nivell del mar (generalment anomenat GMSLR, Global Mean Sea Level Rise) són realitzades per l'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) i tenen en compte diversos casos possibles segons les emissions de gasos d'efecte hivernacle, en  $CO_2$  equivalent, durant el segle XXI. Aquests escenaris s'anomenen RCP (Representative Concentration Pathways), que es troben avaluats al Fifth Assessment Report (AR5) (IPCC, 2013), i són els següents:

- RCP 2.6: considera que les emissions arribaran a un pic cap a 2040 i després es reduiran progressivament fins a finals de segle.
- RCP 4.5: hi ha una estabilització de les emissions a partir de mitjans de segle.
- RCP 6.0: hi ha una estabilització de les emissions però segueixen augmentant al llarg del segle.
- RCP 8.5: aquest escenari considera un increment progressiu de les emissions durant el segle.

La *figura 18* mostra un gràfic representatiu de les emissions previstes per aquests escenaris:

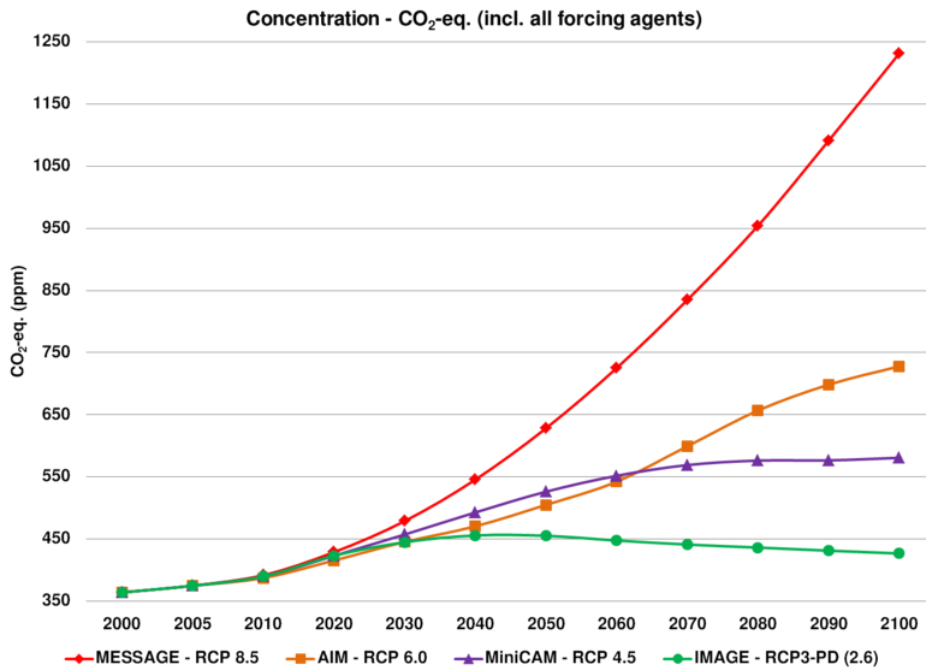


Figura 26. Concentracions atmosfèriques de CO<sub>2</sub>-equivalent de tots els agents segons els escenaris RCP. (Font: Fifth Assessment Report AR5, Representative Concentration Pathways)

Aquests escenaris s’estudien per fer projeccions del increment de temperatura al llarg del segle, així com també els efectes sobre el planeta. Un dels efectes més importants que s’estudia és el que nosaltres avaluem, el increment del nivell del mar. La *taula 4* mostra aquestes projeccions probables (entre el 5% i el 95% de la probabilitat acumulada) de temperatura i increment del nivell mig del mar en els intervals entre els anys 2046-2065 i entre 2081-2100.

Taula 4. Augment global mig de temperatura i de nivell del mar (Font: Fifth Assessment Report AR5, IPCC, 2013)

		2046–2065		2081–2100	
	Scenario	Mean	Likely range <sup>c</sup>	Mean	Likely range <sup>c</sup>
Global Mean Surface Temperature Change (°C) <sup>a</sup>	RCP2.6	1.0	0.4 to 1.6	1.0	0.3 to 1.7
	RCP4.5	1.4	0.9 to 2.0	1.8	1.1 to 2.6
	RCP6.0	1.3	0.8 to 1.8	2.2	1.4 to 3.1
	RCP8.5	2.0	1.4 to 2.6	3.7	2.6 to 4.8
	Scenario	Mean	Likely range <sup>d</sup>	Mean	Likely range <sup>d</sup>
Global Mean Sea Level Rise (m) <sup>b</sup>	RCP2.6	0.24	0.17 to 0.32	0.40	0.26 to 0.55
	RCP4.5	0.26	0.19 to 0.33	0.47	0.32 to 0.63
	RCP6.0	0.25	0.18 to 0.32	0.48	0.33 to 0.63
	RCP8.5	0.30	0.22 to 0.38	0.63	0.45 to 0.82



A més, al AR5 també s'hi troba un rang de valors del GMSLR per a l'any 2100 concretament. Aquestes projeccions són:

- RCP 2.6: 0.44 (0.28 - 0.61)
- RCP 4.5: 0.53 (0.36 - 0.71)
- RCP 6.0: 0.55 (0.38 - 0.73)
- RCP 8.5: 0.74 (0.52 - 0.98)

Així doncs, s'exposaran i raonaran les sobreelevacions que s'utilitzaran per al nostre estudi, segons les últimes observacions al mar Mediterrani (Jevrejeva et al., 2014b).

- Sobrelevació 0.2m: aquest cas l'utilitzarem per a representar la situació actual. Com s'ha vist a l'apartat del clima de la zona, 0,2m és la pujada del nivell del mar en situació de marea màxima pleamar astronòmica, així que seria com considerar que hi ha la tempesta just en aquest moment. A més, es podria considerar com un escenari mitjà del RCP 2.6 cap a mitjans de segle.
- Sobrelevació 0.62m: es tractaria de l'elevació aproximada equivalent a la part superior dels escenaris RCP 4.5 i RCP 6.0 entre 2081 i 2100, o al cas més extrem del RCP 2.6 al 2100.
- Sobrelevació 0.88m: valor de sobrelevació corresponent a la part elevada de l'escenari RCP 8.5, cap al 75% de la probabilitat acumulada d'aquest escenari.
- Sobrelevació 1.8m: s'ha considerat també un escenari crític sota la hipòtesis de grans desgels a l'Antàrtida i Groenlàndia, que es considera com un augment de quasi 2m al nivell mig del mar (Jevrejeva et al., 2014a). Cal comentar, però, que aquest escenari és extremadament improbable.
- Sobrelevació 1.2m: com hi ha una gran diferència entre els sobreelevacions de 0.88m i 1.8m, s'ha proposat aquest escenari per considerar un punt intermedi.

### 3.7 Cabals d'ultrapassament

El factor que analitzem en aquest estudi és el ultrapassament, i que obtenim en els sis punts de la malla que ja s'han mencionat anteriorment. Es consideren aquells valors de descàrrega en direcció perpendicular i positiva cap a la costa, en l/s/m. Cal tenir en compte que els valors que obtenim no són un flux regular, si no uns pics de descàrrega puntuals, com es pot veure a l'exemple en la *figura 27*.

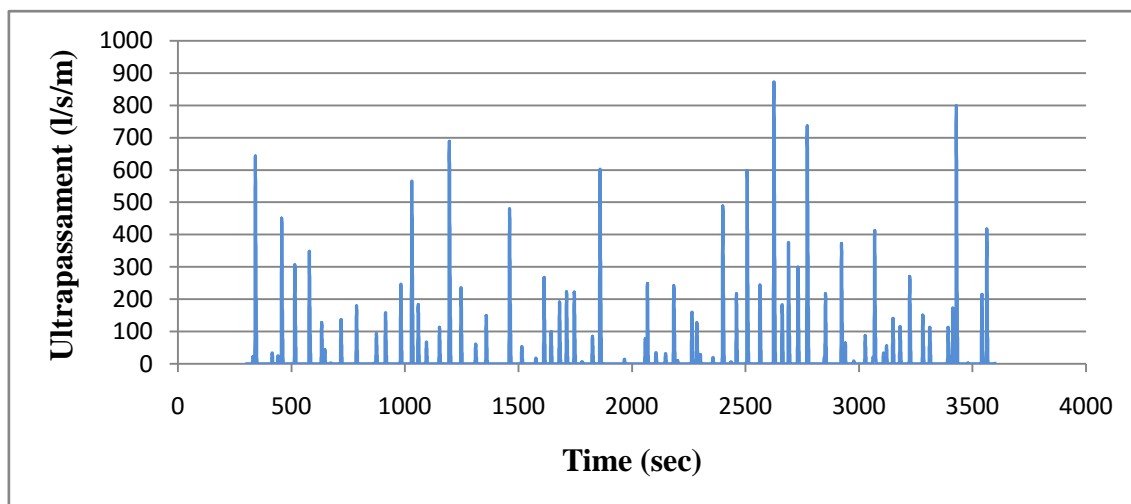


Figura 27. Resultats d'ultrapassament temporals en la boia P5 per al temporal de l'Est,  $T_r=50$  anys, sobrelevació 0,62m

D'aquests resultats s'ha obtingut el cabal mig de descàrrega d'ultrapassament (en l/s/m), que anomenarem  $q_{\text{mean}}$  d'ara en endavant. Aquest el calculem simplement fent la mitja aritmètica dels cabals d'ultrapassament. Tot i que pot semblar que no és una bona aproximació, ja que no es tracta d'un cabal constant si no de pics puntuals, aquest factor ja s'ha tingut en compte en l'estudi de la perillositat.










Els llimars de perillositat, doncs, s'han obtingut del manual EurOtop (*Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures: Assessment Manual*) (Pullen et al., 2007). En aquest manual ja s'ha tingut en compte que la distribució del ultrapassament no és homogènia, i han establert amb aquesta consideració uns llimars de precaució per al  $q_{\text{mean}}$ , especificant quins efectes pot tenir el ultrapassament entre cada límit. Aquests límits es van guiar inicialment d'anàlisis a Japó (Goda, 2010), i deriven de les observacions i mesures fetes pels investigadors del projecte europeu d'investigació CLASH.

A la *taula 5* es mostren, doncs, els llimars i el tipus de perill al que estan relacionats, tal com es troben mencionats i classificats a l'EurOtop. També s'establirà una escala de colors segons els nivells d'alerta (*taula 6*), que s'utilitzarà per les taules dels resultats que es presentaran a l'annex. Considerarem que un nivell d'alerta per sobre de 10 l/s/m afecta a la operativitat de la via.

Taula 5. Llindars d'ultrapassament de l'EurOtop

q mean (l/s/m)	Hazard type and reason
0	-
0.01 - 0.05	Vehicles driving at moderate or high speed, impulsive overtopping giving falling or high velocity jets
0.1	Aware pedestrian, clear view of the sea, not easily upset or frightened, able to tolerate getting wet, wider walkway
0.4	Damage to equipment set back 5-10 m behind the defence
1	Building structure elements
1 -10	Trained staff, well shod and protected, expecting to get wet, overtopping flows at lower levels only, no falling jet, low danger of fall from walkway
10	Sinking small boats set 5.10 m from wall. Damage to larger yachts
10 -50	Vehicles driving at low speed by pulsating flows at a low flow depths, no falling jets, vehicle not immersed
50	Significant damage or sinking of larger yachts / Damage to grassed or lightly protected promenade or reclamation cover
200	Damage to paved or armoured promenade behind seawall

Taula 6. Escala de colors segons l'interval d'ultrapassament

q mean (l/s/m)	Color
0	
0.01-0.05	
0.05-0.1	
0.1-0.4	
0.4-1	
1-10	
10-50	
50-200	
>200	

Per avaluar l'afectació en vies de tren, ens interessen dos factors. El primer és la funcionalitat de la via, que es veurà afectada en l'interval entre 10-50 l/s/m. El segon, per altra banda, és la situació en que la via pot patir danys importants, que serà a partir de 200 l/s/m.

Aquests són els intervals específics per aquest cas, però el nostre estudi té en compte tots els intervals, i les diferències que apreciarem segons la batimetria són aplicables a la resta de situacions que es vulguin tenir en compte.

### 3.8 Resum

Així doncs, a la *taula 7* es presenta en conjunt totes les variacions que s'estudien. Cada combinació possible dels diversos elements és una simulació que es duu a terme.

Taula 7. Resum dels casos d'estudi

	Direcció E	Direcció ESE	Direcció SE
Tr=5anys	Hs=3.45m Tp=8.794s	Hs=2.4495m Tp=7.564s	Hs=1.6215m Tp=6.309s
Tr=10 anys	Hs=4.34m Tp=9.729s	Hs=3.0814m Tp=8.368s	Hs=2.0398m Tp=6.979s
Tr=50 anys	Hs=5.57m Tp=10.858s	Hs=3.9547m Tp=9.339s	Hs=2.6179m Tp=7.789s
<b>Sobreelevacions:</b>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 0.2 m</li> <li>• 0.62 m</li> <li>• 0.88 m</li> </ul>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1.2 m</li> <li>• 1.8 m</li> </ul>			
<b>Batimetries:</b>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Batimetria 1 (original)</li> <li>• Batimetria 2</li> </ul>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Batimetria 3</li> <li>• Batimetria 4</li> </ul>			

D'aquesta manera hi ha un total de 180 combinacions que s'estudien. En cada un dels casos es calcula mitjançant la simulació de SWASH els cabals d'ultrapassament a les boies posicionades en les coordenades que s'han mencionat, i se n'extreu el cabal mig per estudiar la perillositat que presenta i la variació entre les diverses batimetries.

## 4. RESULTATS

Els resultats de les simulacions descrites en el apartat anterior (*taula 7*) es mostren segons la direcció de l'onatge. En cada cas es presenten les diferents combinacions de període de retorn i sobreelevació. Cal recordar, però, que l'acció de l'onatge resulta de la combinació de tots tres paràmetres però que l'objectiu del TFG es veure les implicacions de les variacions batimètriques en el resultat i que molt sovint és la direcció de l'onatge un paràmetre fonamental que determina la perillositat d'un tram de costa.

En l'Annex I es presenten els resultats numèrics obtinguts de tots els casos. A l'Annex II es presenten les figures comparatives. Les més representatives, aquelles en les que s'observa una variació més important, són mostrades i comentades en aquest capítol. A les figures es mostra gràficament la comparació dels resultats entre les quatre batimetries (la primera de referència i les següents amb modificacions) en les sis boies numèriques. Recordem que la boia P1 es troba al sud i la P6 al nord de la malla. També s'hi afegixen línies horitzontals per marcar on es troben els llindars comentats a l'apartat anterior, i que representen els nivells d'alerta dins un sistema de predicció operacional.

### 4.1 Direcció Est

Aquesta és la direcció on es presenten les majors altures d'ona significants i per tant on en principi cal esperar les majors perillositats. Aquesta importància es veurà reflectida en uns nivells d'alerta més alts, sobretot a petites sobreelevacions, on l'onatge és la causa principal d'ultrapassament. Aquests són els temporals locals de Llevant, i tot i incidir en la zona d'estudi amb la major obliquïtat, són els més importants i freqüents.

Els casos analitzats mostren una variació d'ultrapassament des de màxim 0.8 l/s/m en la sobreelevació 0.2m fins a un màxim de més de 300 l/s/m amb un augment del mar màxim de 1.8m, indicant clarament l'important efecte del nivell del mar sobre els resultats.

- **Sobrelevació 0.2m:** la majoria del períodes de retorn amb aquesta sobrelevació donen resultats d'ultrapassament nuls, a excepció del període de retorn de 50anys, que té el màxim onatge analitzat i en el que es pot observar una certa variabilitat (*figura 28*).

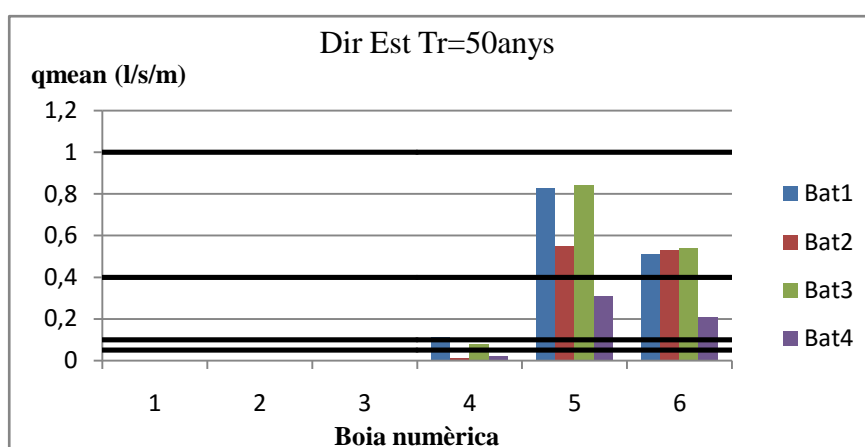


Figura 28. Gràfic comparatiu de  $q_{mean}$  (l/s/m) per a la direcció Est, sobrelevació 0.2m, Tr=50anys.

Com es pot veure a la *figura 28*, els valors d'ultrapassament no superen el 1 l/s/m, però s'aprecia que, en aquesta situació i en els punts que tenim ultrapassament, tenim algunes reduccions de cabal d'ultrapassament. La batimetria 2 redueix en un 34% el qmean en el P5, però no arriba a reduir el nivell d'alerta i la batimetria 3 quasi no varia respecte l'original. Per altra banda, la batimetria 4 redueix en un 63% el ultrapassament en la boia P5, i redueix la perillositat en les dues boies P5 i P6. Tot i així, en valor absolut es tracta de petites diferències de l'ordre de dècimes de l/s/m.

En aquest cas, la incertesa de la batimetria genera un canvi en el nivell d'alerta en aquells trams, trobant-se entre provocar danys a equipament i material, o al nivell inferior en que afecta a vianants però no a equipament.

- Sobreelevació 0.62m: en aquesta sobreelevació obtenim ultrapassament a tots els períodes de retorn, i comencem a poder apreciar més significativament els efectes generals de la incertesa entre les nostres batimetries.

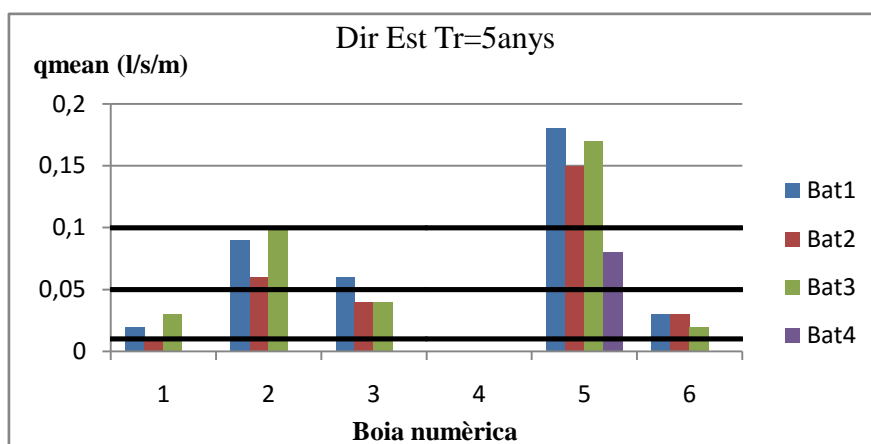


Figura 29. Gràfic comparatiu de qmean (l/s/m) per a la direcció Est, sobreelevació 0.62m, Tr=5anys.

La *figura 29* representa el cas de Tr=5 anys, i en ella s'observa una major incertesa que en el cas de la *figura 28*. Les diferències en valor absolut entre les batimetries 1, 2 i 3 són molt petites, de l'ordre de centèsimes de l/s/m, però tot i així arriben a reduir la perillositat en la boia P3, tot i que entre 0.01-0.05 l/s/m encara afectaria a cotxes, tot i que el carrer es troba passada la via així que segurament no arribaria l'afectació. En aquest cas, la batimetria 4 tan sols presenta ultrapassament al P5, eliminant la perillositat a tots els altres trams, i la variabilitat en aquest punt permetria evitar afectacions als vianants.

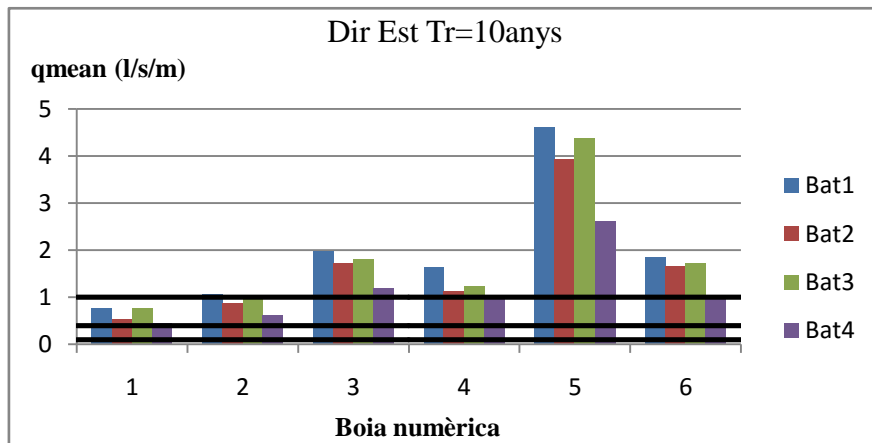


Figura 30. Gràfic comparatiu de  $q_{mean}$  (l/s/m) per a la direcció Est, sobreelevació 0.62m, Tr=10anys.

El cas de període de retorn de 10 anys (*figura 30*) ja presenta una incertesa i unes diferències proporcionals entre les batimetries més reduïdes. Tant la batimetria 2 com la batimetria 3 no presenten cap variació rellevant ni de perillositat. La incertesa generada per la batimetria 4 podria reduir en un 45% el cabal d'ultrapassament en la boia P5, i ja de l'ordre d'unitats de l/s/m. Tot i així aquesta incertesa no modificaria el nivell d'alerta, que per sobre de 1 l/s/m es troba en afectació a elements exteriors d'edificis i similars, però les edificacions es troben prou allunyades de la costa així que la seva importància seria en els vehicles que podrien circular darrere la via. El que sí afectaria és en quins trams el personal entrenat podria accedir amb diversos graus de risc.

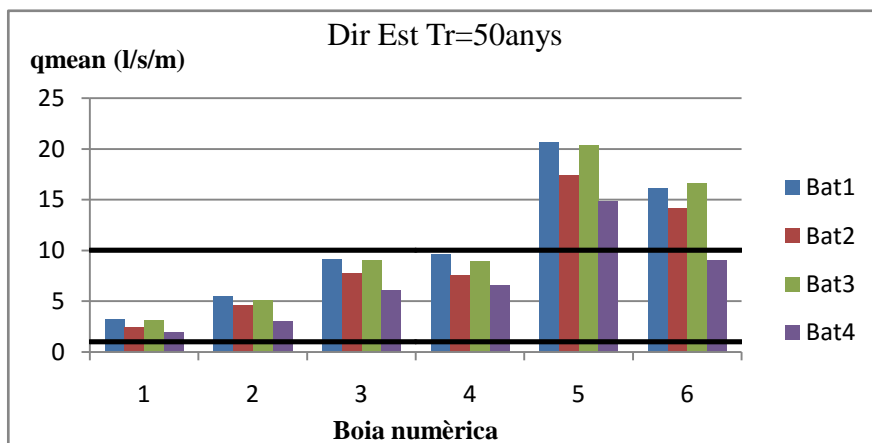


Figura 31. Gràfic comparatiu de  $q_{mean}$  (l/s/m) per a la direcció Est, sobreelevació 0.62m, Tr=50anys.

A la *figura 31* es representa el cas de període de retorn de 50 anys, i s'hi detecta la mateixa tendència que en els altres casos. La batimetria 2 redueix al voltant d'un 20% però no afecta al nivell d'alerta. La batimetria 3 quasi no varia respecte l'original així que no augmenta la incertesa. Tal com ja esperem, la batimetria 4 és la que major incertesa efectua, amb una variació de fins a un 45% a la boia P6, la única on, a més, afectaria el nivell de perillositat.

Cal comentar, però, que en aquest cas al tenir un dels trams amb un valor de cabal superior a 10 l/s/m, ja es consideraria que la via no podria operar en aquella zona, tot i que a altres punts d'estudi no el superi, ja que el ferrocarril ha de poder circular per tot el recorregut estudiat.

- **Sobreelevació 0.88m:** a partir d'aquesta sobreelevació comencem a observar que la tendència general comentada es consolida: el ultrapassament a la batimetria 2 és lleugerament inferior a l'inicial, a la batimetria 3 és quasi igual que la original, i altre cop, la batimetria 4 redueix una mica més. Apreciem que, tot i que en valor absolut la variació de resultats és cada cop major, la diferència proporcional és cada cop menor, el que implica que la incertesa en ultrapassament segons la batimetria és cada cop menor, i els nivells d'alerta varien menys.

Els tres casos de període de retorn tenen una relació de resultats semblant, així que només es mostrarà el cas de  $Tr=10$  anys (figura 32) i els altres a l'annex. Cal comentar que el cas de període de retorn de 5 anys no supera els 10 l/s/m en cap punt ni batimetria, i és l'únic que encara permet la funcionalitat de la via.

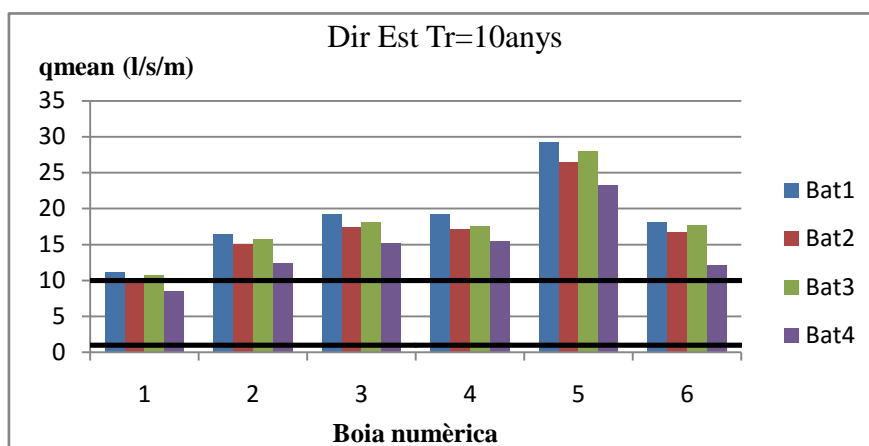


Figura 32. Gràfic comparatiu de  $q_{mean}$  (l/s/m) per a la direcció Est, sobreelevació 0.88m,  $Tr=10$ anys.

En el cas mostrat, la major variabilitat es troba en el cas de la boia P6, en que el ultrapassament de la batimetria 4 és, en valor absolut, uns 6 l/s/m menor que el de la batimetria original, però proporcionalment tan sols un 30% menor.

- **Sobreelevació 1.2m:** es segueix observant la tendència anterior, i en tots els casos s'aprecia que les diferències entre els resultats de les batimetries són cada cop menys significants, ja que proporcionalment ja no són importants. Per a tots tres períodes de retorn, la via es trobaria inhabilitada per al funcionament ja que tots superen ja el límit de 10 l/s/m. Tot i així, en cap cas, ni tan sols el  $Tr=50$  anys el  $q_{mean}$  supera els 200 l/s/m i no causarien danys estructurals a la via i al paviment.

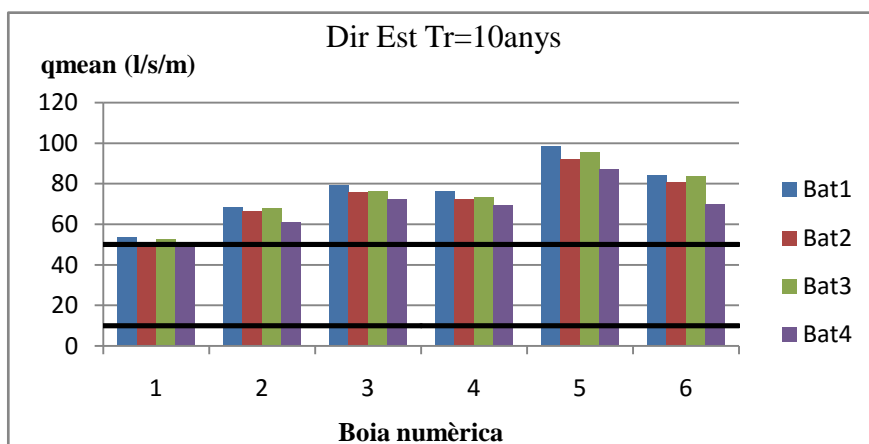


Figura 33. Gràfic comparatiu de  $q_{mean}$  (l/s/m) per a la direcció Est, sobreelevació 1.2m,  $Tr=10$ anys.



Utilitzarem d'exemple d'aquesta sobreelevació el període de retorn de 10 anys (*figura 33*). Veiem com es va reduint la incertesa proporcional, ja que la boia en que més variació hi ha és la P6, i tan sols té una variació d'un 14%, i cap modificació del nivell d'alerta.

Tenint en compte tots els casos mostrats, s'aprecia també la variabilitat del ultrapassament i conseqüentment del nivell d'alerta que es genera entre diverses boies. Generalment, el major valor de  $q_{mean}$  es dona a la boia P5, que és la que condiciona en algunes situacions la operativitat de la via i el nivell d'alerta de la zona en general.

- Sobreelevació 1.8m: amb una pujada del nivell del mar tan gran, les diferències entre els resultats de cada batimetria són gairebé negligibles, i en tots els casos la perillositat arriba al nivell de provocar danys a la via, tot i que en la situació de període de retorn 5 anys (*figura 34*) tan sols succeeix al tram de la boia P5.

Això és degut a que les nostres boies es troben situades a terra a aproximadament 1m per sobre el nivell del mar, el que implica que en aquesta sobreelevació el mar inundaria directament la via i el carrer de darrere. A l'apartat en que s'han comentat les sobreelevacions, ja s'ha explicat que aquest és un cas molt extrem i molt improbable, però serveix per estudiar com la diversitat de formes de fons perd importància quan es troben molt per sota el nivell del mar, ja que no arriben a afectar a les onades.

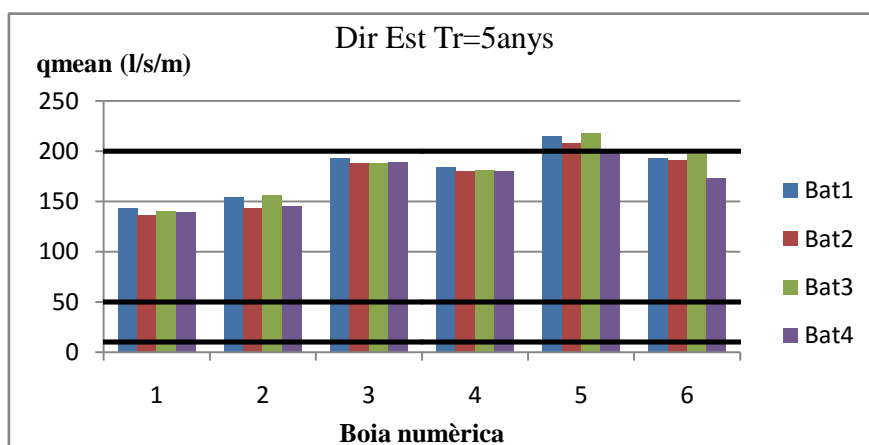


Figura 34. Gràfic comparatiu de  $q_{mean}$  (l/s/m) per a la direcció Est, sobreelevació 1.8m, Tr=5anys.

#### 4.2 Direcció Est-sud-est

Els temporals provinents d'aquesta direcció ja no incideixen de manera tan obliqua a la costa, però degut a que es caracteritzen per una menor alçada d'ona significant que els temporals de l'est, s'espera que els cabals d'ultrapassament siguin generalment menors. Tot i així, podem observar com la afectació de la incertesa en la batimetria és influenciada per la direcció d'incidència de l'onatge.

Els resultats d'ultrapassament, tal com s'espera, delimiten un gran rang en funció de la sobreelevació. Mentre que la sobreelevació de 0.2m tan sols troba ultrapassament puntualment de 0.06 l/m/s, amb la pujada de 1.8m tornariem a arribar a 300 l/s/m.

- Sobreelevació 0.2m: els temporals procedents d'aquesta direcció no són cap perill quan ens trobem amb un cas de sobreelevació de tan sols 0.2m. No es produeix ultrapassament en cap dels punts per als períodes de retorn de 5 i 10 anys, i al  $Tr=50$  anys tan sols pateix un ultrapassament petit (entre 0.01-0.06 l/s/m segons la batimetria) en la boia P6, que aplicaria un nivell d'alerta per a cotxes. No ens influencia en la nostra situació i no és representatiu per a estudiar la incertesa.

- Sobreelevació 0.62m: a diferència de la direcció est, que té majors altures d'ona, per al període de retorn de 5 anys i aquesta sobreelevació no patim cap ultrapassament a la via.

En el cas de  $Tr=10$  anys (*figura 35*), podem observar les mateixes tendències de la direcció est. La batimetria 2 generalment redueix lleugerament, en aquest cas el suficient per a disminuir la perillositat al tram de la boia P5, tot i que la perillositat de 1 l/s/m recordem que afectava l'exterior d'edificis, que no són tan a prop. La batimetria 4 inclou una variabilitat considerable al P5, disminuint dos nivells d'alerta, per sota de 0.4 l/s/m que provocaria danys a equipament. Aquesta incertesa és d'un 65% respecte el resultat per a la batimetria de referència. També apreciem que el tram corresponent a P5 seria, tal com ho es per a la direcció est, el punt més conflictiu amb diferència.

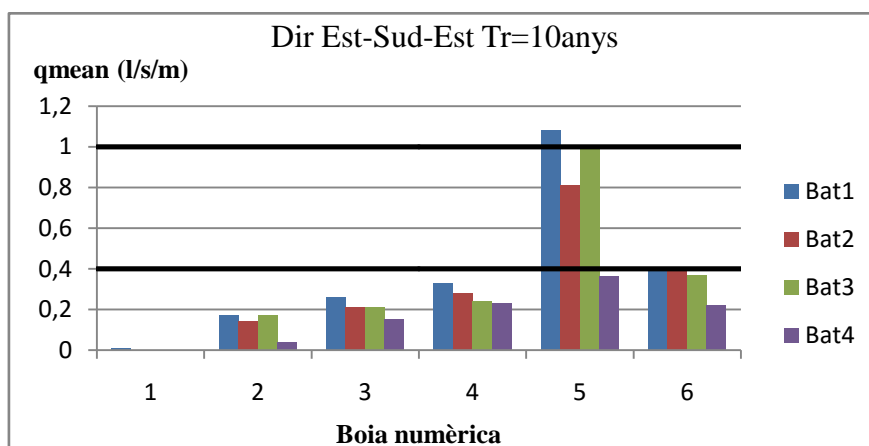


Figura 35. Gràfic comparatiu de  $q_{mean}$  (l/s/m) per a la direcció Est-sud-est, sobreelevació 0.62m,  $Tr=10$  anys.

Per altra banda, el cas de període de retorn de 50 (*figura 36*) té una distribució proporcional dels resultats prou similar al cas de la *figura 31* (direcció Est, sobreelevació 0.62m,  $Tr=50$  anys) però amb uns valors absoluts bastant inferiors. Mentre que el màxim cabal de descàrrega per aquesta situació amb onatge provinent de l'est és d'uns 20 l/s/m impedit l'ús de la via, quan es tracta d'onatge provinent de l'est-sud-est amb el mateix  $Tr$  el cabal màxim que obtenim és de 8 l/s/m i no impedeix la operativitat ferroviària. Aquesta relació reflecteix molt bé la diferència de perillositats que representa la direcció de provenença de l'onatge.

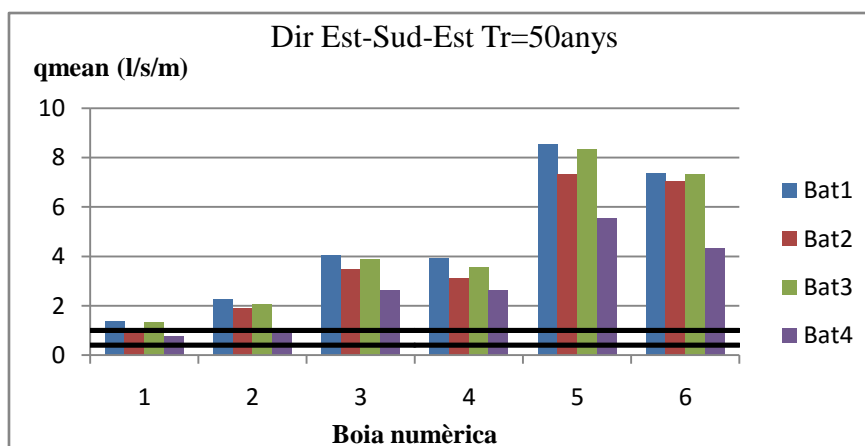


Figura 36. Gràfic comparatiu de  $q_{mean}$  (l/s/m) per a la direcció Est-sud-est, sobrelevació 0.62m,  $Tr=50$ anys.

- Sobrelevació 0.88m: aquesta sobrelevació presenta la mateixa tendència general de distribució del ultrapassament entre les batimetries, però amb menors valors absoluts a cada cas que en els cabals provocats per l'onatge de l'Est. El cas de  $Tr=5$  anys (figura 37) és l'únic que no supera els 10 l/s/m i, per tant, l'únic que en permet l'ús ferroviari.

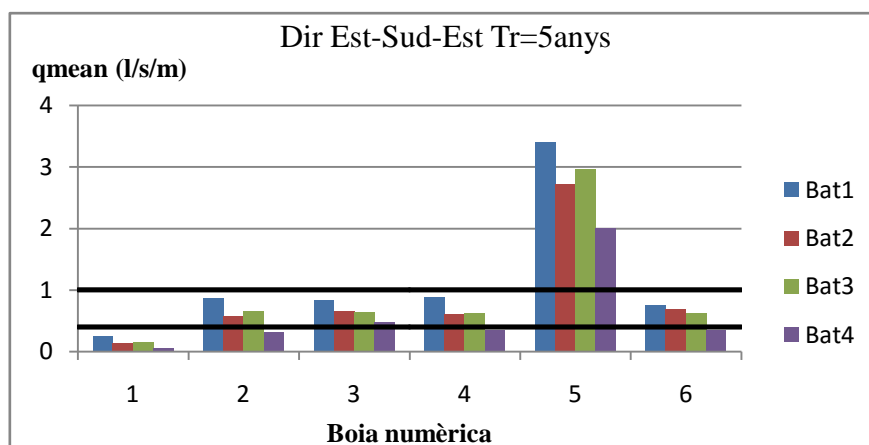


Figura 37. Gràfic comparatiu de  $q_{mean}$  (l/s/m) per a la direcció Est-sud-est, sobrelevació 0.88m,  $Tr=5$ anys.

La major incertesa apreciada a la figura 37 en valor absolut torna a ser en el P5, amb una possible reducció d'un 40% per a la batimetria 4, però és en altres punts en que, tot i tenir menor variabilitat, es modifica el nivell d'alerta.

- Sobrelevació 1.2m: tal com s'observa anteriorment i per a les altres direccions també, en aquesta sobrelevació la que la incertesa depenent de la batimetria es torna molt petita i, excepte en alguna boia, no genera una variació en el nivell d'alerta. Amb el cas de  $Tr=10$ anys (figura 38) es pot veure la reducció respecte el cas de la direcció Est (figura 33). Hi ha una diferència aproximada d'un 20% entre direccions per al mateix  $Tr$  i un diferent nivell de perillositat en varis trams, altre cop representant la influència del major onatge.

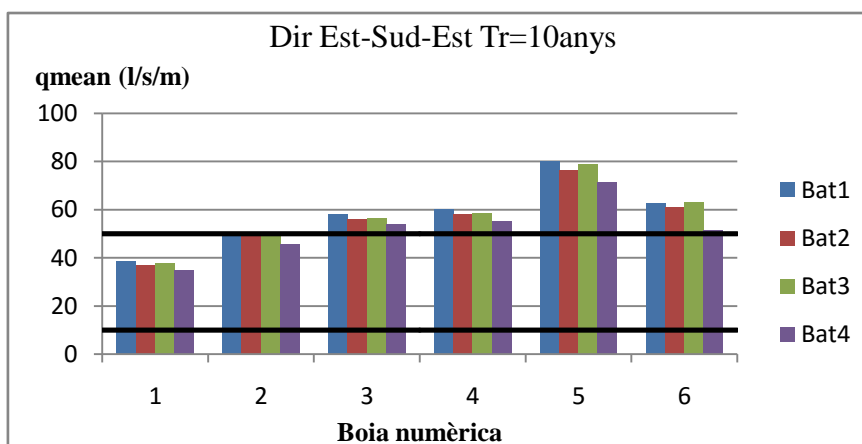


Figura 38. Gràfic comparatiu de  $q_{mean}$  (l/s/m) per a la direcció Est-sud-est, sobrelevació 1.2m,  $Tr=10$ anys.

- Sobrelevació 1.8m: les diferències en els resultats de cabals per a aquesta sobrelevació són molt petites, i es troben generalment en un rang de diferència del 5%, essent una variabilitat molt petita. La pujada del nivell del mar i l'alçada d'onatge predominen en aquesta situació.

Respecte el major onatge de la direcció Est, es segueix apreciand la diferència dels cabals, però no la suficient per reduir el nivell d'alerta. A més, tant en situació de període de retorn de 10 anys, com encara més amb període de retorn de 50 anys (figura 39), el cabal d'ultrapassament supera fàcilment el límit dels 200 l/s/m en la majoria de boies.

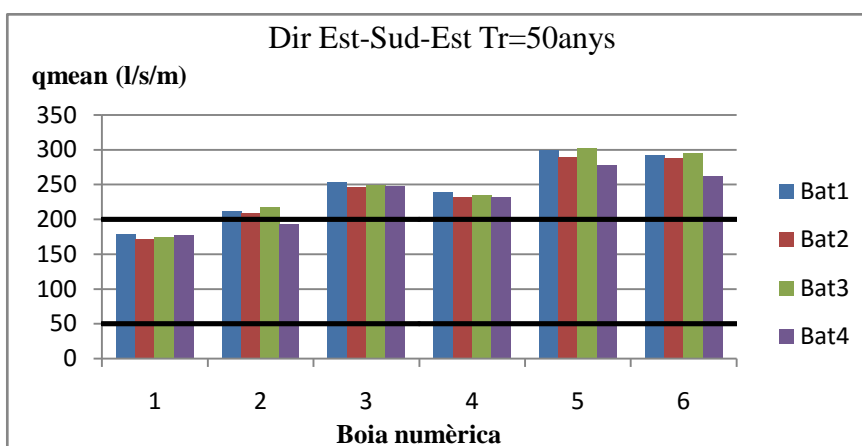


Figura 39. Gràfic comparatiu de  $q_{mean}$  (l/s/m) per a la direcció Est-sud-est, sobrelevació 1.8m,  $Tr=50$ anys.

### 4.3 Direcció Sud-est

Aquesta direcció, tot i ser la més perpendicular a la costa, és la que té alçades d'ona més petites per a un mateix període de retorn, ja que l'alçada d'ona corresponent a un  $Tr=50$  anys per a la direcció sud-est és menor que l'alçada d'ona associada a un  $Tr=5$  anys provinent de l'est, i tan sols lleugerament major que l'alçada d'ona associada a un  $Tr=10$  anys de direcció est-sud-est. Així doncs, cal esperar que tots els resultats siguin considerablement inferiors als casos de les altres dues direccions, tot i que la seva perpendicularitat a la costa li ofereix més facilitat per al ultrapassament.

- Sobreelevació 0.2m: tots els resultats d'ultrapassament d'aquest cas són nuls. Aquest resultat coincideix amb les altres direccions, ja que en el cas de la direcció est-sud-est no hi havia ultrapassament rellevant amb aquest nivell del mar, i tenia una alçada d'ona superior.

- Sobreelevació 0.62m: aquest augment del nivell del mar provocaria ultrapassament en un cas de tempesta del sud-est de període de retorn de 50 anys (*figura 40*). Té una distribució del ultrapassament entre les boies molt similar al de la *figura 28* (direcció Est, sobreelevació 0.2m,  $Tr=50$  anys), però amb valors absoluts de cabal més petits. Aquests valors es troben entre el 0.20-0.25 l/s/m, amb l'única variabilitat rellevant amb la batimetria 4, que redueix en un 60% els altres resultats a la boia P5. Són valor màxims similars als del cas de la *figura 29* (direcció Est, sobreelevació 0.62m,  $Tr=5$  anys).

Amb aquests comparacions ja s'il·lustra prou bé la diferència que hi ha en els resultats segons la direcció de l'onatge incident, i com afecta molt la freqüència de l'onatge.

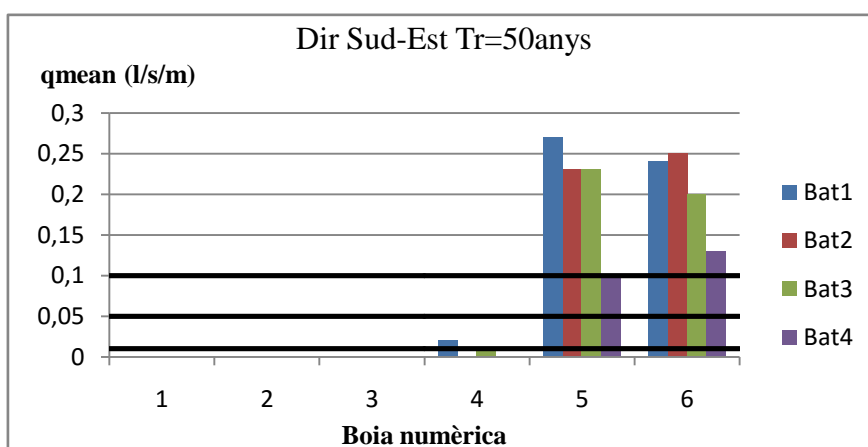


Figura 40. Gràfic comparatiu de qmean (l/s/m) per a la direcció Sud-est, sobreelevació 0.62m, Tr=50anys.

- Sobreelevació 0.88m: tal com esperem, a diferència de la situació amb les dues altres direccions, els cabals d'ultrapassament no són tan grans amb aquesta sobreelevació. Amb  $Tr=5$ anys, des de la direcció Sud-est no hi ha ultrapassament.

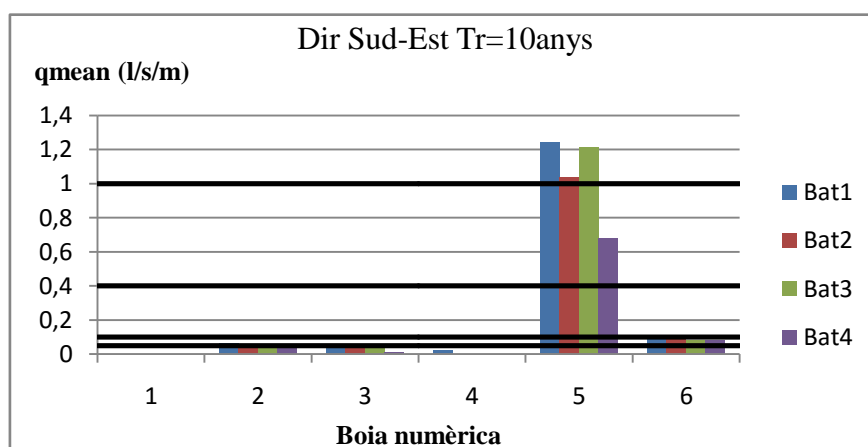


Figura 41. Gràfic comparatiu de qmean (l/s/m) per a la direcció Sud-est, sobreelevació 0.88m, Tr=10anys.

En la situació del període de retorn de 10 anys (*figura 41*) s'observa que l'única boia on hi ha un cabal de descàrrega significatiu és en la P5. Fins i tot la incertesa que genera la batimetria 4 (una reducció d'un 45% respecte la referència) no és suficient per disminuir en aquell tram l'alerta per sota de 0.4 l/s/m, de manera que els danys a equipament en aquell tram serien inevitables, tot i que hi podria accedir personal entrenat per a ajudar a minimitzar els danys.

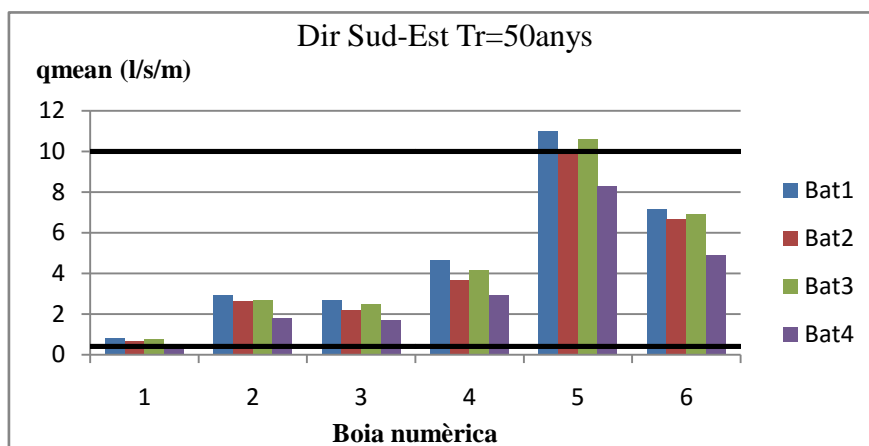


Figura 42. Gràfic comparatiu de  $q_{mean}$  (l/s/m) per a la direcció Sud-est, sobreelevació 0.88m, Tr=50anys.

Veiem que per al Tr=50 anys (*figura 42*), altre cop tenim un pic molt gran a la boia P5, amb una variabilitat d'un 25-30 % causada per la batimetria 4, que podria causar una variació del nivell d'alerta en el tram del P5, just al límit de 10 l/s/m que correspon al límit a partir del qual considerem que la via no seria operativa, tot i que tan sols sigui en un dels trams.

Comparativament amb les altres direccions, notem que tant des de l'est com des de l'est-sud-est, amb aquesta elevació del mar la via queda fora de servei per als períodes de retorn de 10 i 50 anys, mentre des del sud-est tan sols per al període de retorn de 50 anys i es troba molt al límit.

- Sobreelevació 1.2m: en aquesta sobreelevació, fins i tot des d'aquesta direcció que ens ha estat donant resultats de cabal molt menors a les altres tots els casos estudiats donen resultats d'ultrapassament per sobre de 10 l/s/m. El cas de Tr=5 anys (*figura 43*) en alguns trams té un cabal inferior a aquell llindar, però no afecten al nivell d'alerta general.

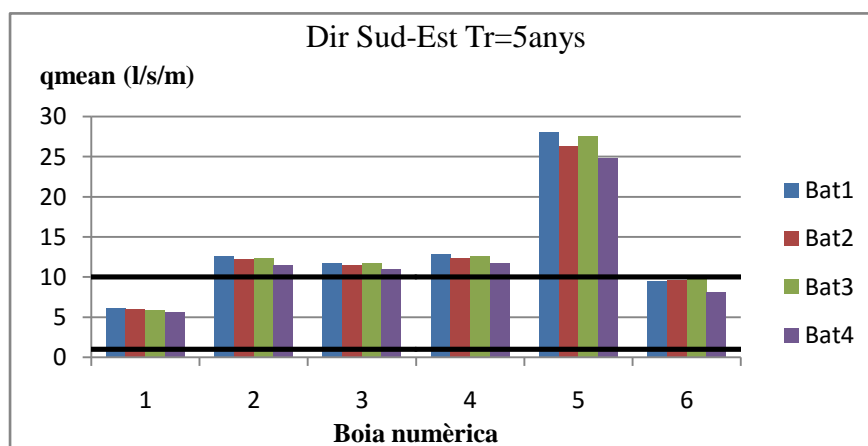


Figura 43. Gràfic comparatiu de  $q_{mean}$  (l/s/m) per a la direcció Sud-est, sobreelevació 1.2m, Tr=5anys.

Tal com en les altres direccions, amb la sobrelevació de 1.2m es redueix molt la incertesa causada per la batimetria. La variabilitat es troba al voltant del 10% respecte la batimetria de referència, però sense afectar al nivell de perillositat que, com ja hem comentat, deixa la via inoperativa.

- Sobrelevació 1.8m: tal com succeeix amb les altres direccions de l'onatge, quan estudiem els resultats amb una pujada del nivell del mar de 1.8m, la incertesa i variabilitat depenent de la batimetria gairebé desapareixen, ja que els factors decisius són la sobrelevació i l'onatge. La distribució del ultrapassament entre les diverses boies també es manté.

Per altra banda, fins i tot amb sobrelevació de 1.8m, des de la direcció sud-est no hi hauria danys estructurals a la via i al paviment per al període de retorn de 5 anys, és a dir que hi ha cabals d'ultrapassament menors de 200 l/m/s. Per al  $Tr=10$  anys (figura 44) el cabal de la boia P5 es troba just al llindar, mentre a les altres direccions s'havia superat aquell nivell d'alerta. Per a període de retorn de 50 anys, però, si que s'arriba als 220-240 l/s/m, tot i que tan sols a les boies P5 i P6.

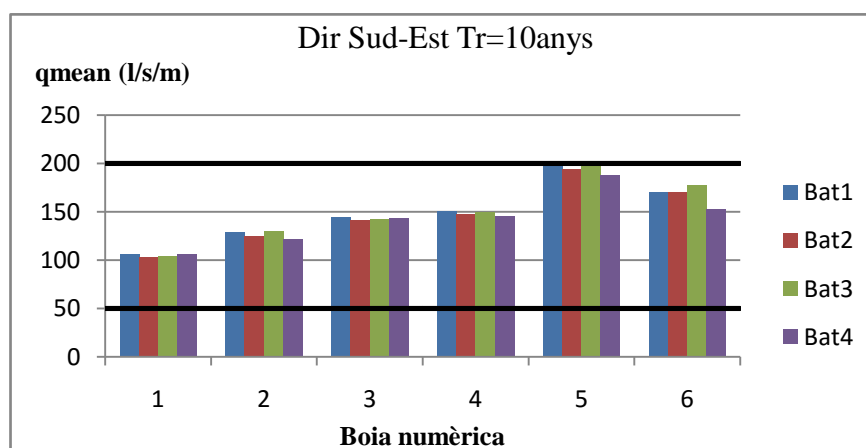


Figura 44. Gràfic comparatiu de  $q_{mean}$  (l/s/m) per a la direcció Sud-est, sobrelevació 1.8m,  $Tr=10$ anys.

## 5. DISCUSSION DE RESULTATS

Tot i que ja s'ha comentat breument cada gràfica que s'ha presentat a l'apartat dels resultats, a continuació es farà un resum de les característiques més importants que s'extreuen dels resultats.

Primer de tot, hem observat que, des de qualsevol direcció d'onatge, sempre hi ha una distribució similar dels cabals entre els trams de la via (associats a les boies numèriques P1-P6). Això té molt de sentit, ja que sempre hi ha trams de major perillositat en aquestes situacions. En el nostre cas, el punt més conflictiu és el corresponent a la boia P5 per a totes les combinacions de casos. Els resultats de les boies P1-P4 han mantingut una relació entre si regular i similar en quasi tots els casos, sempre amb valors inferiors als cabals en P5.

Això no és així amb els resultats corresponents al P6, que tenen més variabilitat. Ens podem fixar que per a períodes de retorn de 5 i 10 anys, el ultrapassament a la boia P6 té unes dimensions similars al registrat a les boies P1-P4, mentre que per al període de retorn de 50 anys generalment es troba lleugerament per sota del cabal d'ultrapassament al punt P5. Així doncs, podem dir que aquell tram és més susceptible als canvis d'onatge que no pas la resta de l'àrea d'estudi. Aquesta variabilitat pot ser deguda a la batimetria o pot ser deguda a la posició que ocupa en la simulació, ja que si ens fixem altre cop en la *figura 10* (apartat 3.2) observem que és el punt més proper al marge dret de la malla, i això podria ocasionar aquesta variació.

També es pot veure que, per a cabals petits, la perillositat pot variar molt bruscament d'un tram a un altre de la via, mentre que per a cabals més grans el nivell d'alerta es manté més constant en tota l'àrea d'estudi. Això també és un resultat lògic, ja que els intervals entre nivells de perillositat són petits quan tractem amb cabals petits, per cobrir més possibles situacions desfavorables, i són intervals més grans quan tractem cabals d'unes dimensions superiors. Així doncs, per a situacions de cabals grans és menys útil tenir en compte les diferències entre els trams i més útil fixar-se en una perillositat general, mentre que per a cabals petits pot ajudar a discernir els trams on s'hauria d'efectuar més prevenció.

En quant a l'objectiu principal del treball, avaluem les variacions dels resultats segons la batimetria. De forma resumida:

- Batimetria 1: la original i la que prenem de referència
- Batimetria 2: barra de sorra a poca profunditat, estat molt comú i que es genera en situacions de tempestes no gaire fortes (paràmetre de Dean ~2)
- Batimetria 3: canal a una certa distància de la costa, estat poc comú, possiblement generat per alguna tempesta molt forta (paràmetre de Dean ~6)
- Batimetria 4: afegir una elevació en comptes d'un canal, simulant una possible actuació artificial o una gran barra de sorra a major profunditat.

Es pot discernir fàcilment una norma general després d'estudiar tots els casos.

La batimetria 2 ocasiona lleugeres reduccions en el cabal d'ultrapassament respecte el cabal inicial de referència. En situacions de cabals menors i baixos nivells de perillositat, aquesta possible forma del fons afegeix una certa incertesa i variabilitat, però per a cabals una mica superiors ja no afecta de manera rellevant. Això ens indica que una barra de sorra a poca



profunditat, tal com podríem esperar, afecta sobretot a situacions de cabals menors i poc nivell de perillositat.

Els resultats de la batimetria 3 són quasi iguals que en la batimetria 1, per totes les situacions. D'això en podem extreure que un canal a profunditat mitjana no ens aportaria variabilitat al ultrapassament. Com aquesta forma de fons és possible que es generi a causa d'alguna tempesta molt forta (tot i que ja hem vist que era una situació poc comuna), implica que, si per casualitat es succeïssin una tempesta de gran període de retorn i just seguidament una altre, podríem seguir considerant els resultats de la batimetria original com a un bon indicatiu.

Per altra banda, la batimetria 4, tal com esperàvem, afegeix molta incertesa als possibles resultats de cabals d'ultrapassament. Així doncs, la barra de sorra protegeix la zona costera de l'onatge incident, però tan sols per a nivells del mar poc i mitjanament elevats. Per a sobreelevacions importants, en canvi, les onades no es troben afectades tant per la forma i ja no hi ha variabilitat. Tot i així, la incertesa generada amb aquesta batimetria resulta en diversos possibles nivells d'alerta per a una mateixa situació.

Com s'ha comentat, hem observat que com major fos la sobreelevació del mar, més indiferents són els resultats a les formes del fons. Això succeeix perquè les onades passen tan per sobre del fons que ja no es veuen afectades, i l'element clau en el ultrapassament és el nivell del mar. Això augmenta el perill associat a les tempestes que provoquin pujada del mar, però disminueix la incertesa que ens podria generar el factor de la batimetria.

## 6. CONCLUSIONS I FUTURS DESENVOLUPAMENTS

En aquest estudi hem analitzat com varia el ultrapassament en una certa zona al tenir diverses situacions de diferent batimetria, i en una ampla gamma de casos possibles, tant direccionalment com de període de retorn, i amb diverses possibles sobreelevacions del mar.

D'aquests resultats en concloem que la batimetria és un factor important en la magnitud del ultrapassament, però que depèn molt de cada cas batimètric concret.

- Batimetries 2 i 3: Les variacions en la batimetria més plausibles són petites respecte al patró batimètric de referència, i les variacions induïdes en el ultrapassament també. Per a la batimetria 2 obtenim uns cabals d'ultrapassament entre el 80% i el 97% del cabal de referència, i per a la batimetria 3 entre el 90% i el 100% del cabal de referència. Aquests canvis majoritàriament no representen un canvi en el nivell d'alerta i per tant la seva influència en un sistema d'alerta primerenc és baixa o molt baixa. Per altra banda, la variació del nivell del mar redueix les variacions que produeixen les diferents batimetries, obtenint una diferència de cabals cada cop menor al augmentar la sobreelevació del mar.

- Batimetria 4: Els resultats obtinguts en aquesta batimetria, que es correspon amb l'existència d'una barra de sorra submergida, han mostrat canvis significatius en els valors finals d'ultrapassament, amb valors de cabal des del 50% fins al 95% respecte els cabals obtinguts amb la referència. Aquests canvis suposen un nivell d'alerta inferior en molts dels casos donat que la barra actua com a element morfològic dissipador d'energia. En aquest cas, la pujada del nivell del mar redueix l'efecte dissipatiu de la barra, de tal manera que per a majors sobreelevacions els resultats són molt més semblants als de referència. Per aquest motiu hi ha un rang tan ampli de relació entre el ultrapassament en la batimetria 4 i en la batimetria de referència.

Conèixer quins rangs de valors són possibles en totes aquestes situacions és una informació molt útil, ja que permet prendre accions amb antelació i de forma proactiva. Les dades marítimes en alta mar les podem conèixer anticipadament mitjançant un sistema d'alarma primerenca, de manera que podem saber si s'acosta una tempesta i les seves característiques, i gràcies a aquest tipus d'estudis podríem establir quin rang probabilístic d'ultrapassament patirem en la zona i prendre mesures en funció de a quins possibles nivells d'alerta correspon.

### Treballs futurs

Aquesta feina obre portes a una gran quantitat de possible treball futur. Es pot continuar creant noves modificacions possibles de la batimetria en aquesta zona (o realitzar un estudi similar a altres zones d'interès) i obtenir suficients dades per establir un catàleg que, en base a la direcció, període de retorn i sobreelevació del mar, però desconeixent la forma exacta de la batimetria en aquell moment, ens aportí un rang probabilístic de cabals d'ultrapassament en cada tram (considerant que cada punt estudiat és representatiu d'un tram de la zona) i també ens informi dels possibles nivells de perillositat. Amb aquesta informació es poden prendre mesures per evitar danys materials i preveure danys a les persones també.

També seria interessant realitzar aquest tipus d'estudi en casos de platges que, generalment, es trobin en un estat morfològic diferent. La nostra zona d'estudi té una mida del gra de la sorra gruixut, el que implica que generalment es troba en un estat reflectiu, i que la batimetria pateix canvis petits respecte la de referència. En altres zones d'estudi on hi hagi una mida de gra més fina i que es trobin generalment en un estat dissipatiu, podríem esperar que es patissin majors variacions en la batimetria. Així doncs, l'efecte que aquestes variacions tindrien en el ultrapassament en aquelles platges possiblement no seria el mateix.

## 7. REFERÈNCIES

### Articles i documents

- Bolanos, R., Jorda, G., Cateura, J., Lopez, J., Puigdefabregas, J., Gomez, J. and Espino, M., 2009. "The XIOM: 20 years of a regional coastal observatory in the Spanish Catalan coast". *Journal of Marine Systems*, 77: 237-260.
- CIIRC, 2010. *Estat de la zona costanera a Catalunya*. (Departament de Política Territorial i Obres Públiques) Generalitat de Catalunya. Disponible a: [http://www.igc.cat/web/es/costa\\_lvzcc\\_acces.php](http://www.igc.cat/web/es/costa_lvzcc_acces.php)
- Church, J.A., P.U. Clark, A. Cazenave, J.M. Gregory, S. Jevrejeva, A. Levermann, M.A. Merrifield, G.A. Milne, R.S., Nerem, P.D. Nunn, A.J. Payne, W.T. Pfeffer, D. Stammer and A.S. Unnikrishnan, 2013: Sea Level Change. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Fifth Assessment Report, Chapter 13. Sea Level Change. Disponible a: [http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5\\_Chapter13\\_FINAL.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_Chapter13_FINAL.pdf)
- Davies, S., 1964. "A morphogenic approach to world shorelines". *Zeitschrift fur Geomorphology*, 8: 127-142.
- Goda, Y., 2010. *Random Seas and Design of Maritime Structures, Advanced Series on Ocean Engineering Vol. 33*. World Scientific.
- Gracia, V., Sánchez-Arcilla, A., García-León, M., Gault, J., Oller, P., Fernández, J., Sairouni, A., Cristofiori, E. and Toldrà, R., 2014. *A new generation of early warning systems for coastal risk. The iCoast Project*. Proceedings of the 34th International Conference on Coastal Engineering.
- IPCC, 2013: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Disponible a: [http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5\\_SPM\\_FINAL.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_SPM_FINAL.pdf)
- Jevrejeva, S., Grinsted, A. and Moore, J.C., 2014a. "Upper limit for sea level projections by 2100". *Environmental Research Letters*, 9(10): 104008.
- Jevrejeva, S., Moore, J.C., Grinsted, A., Matthews, A. and Spada, G., 2014b. "Trends and acceleration in global and regional sea levels since 1807". *Global and Planetary Change*, 113: 11-22.
- Lin-Ye, J., Garcia-Leon, M., Gracia, V. and Sanchez-Arcilla, A., 2016. "A multivariate statistical model of extreme events: An application to the Catalan coast". *Coastal Engineering*, 117: 138 - 156.
- Pullen, T., Allsop, N., Bruce, T., Kortenhaus, A., Schutrumpf, H. and Van Der Meer, J., 2007. *EurOtop: Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures: Assessment Manual*. 178p., Environment Agency, UK/Expertise Network Waterkeren, NL/Kuratorium fur Forschung im Kusteningenieurwesen, DE, ISBN 978-3-8042-1064-6. Disponible a: <http://www.overtopping-manual.com/eurotop.pdf>

- Salas Pérez, M. (2015) *Estudi d'ultrapassament en les vies de tren del Maresme*. Col·laboració amb el Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental (DEHMA)
- Salvadori, G., De Michele, C., Kottegoda, N.T. and Rosso, R., 2007. *Extremes in nature: An approach using copulas*. Springer.
- Sánchez-Arcilla, A., Garcia-Leon, M. and Gracia, V., 2014. "Hydro-morphodynamic modelling in Mediterranean storms - errors and uncertainties under sharp gradients". *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 14: 2993-3004.
- Sánchez-Arcilla, A., García-León, M., Gracia, V., Devoy, R., Stanica, A. and Gault, J., 2016a. "Managing coastal environments under climate change: Pathways to adaptation". *Science of The Total Environment*.
- Sánchez-Arcilla, A., Sierra, J.P., Brown, S., Casas-Prat, M., Nicholls, R.J., Lionello, P. and Conte, D., 2016b. "A review of potential physical impacts on harbours in the Mediterranean Sea under climate change". *Regional Environmental Change*: 1-14.
- Short, A.D., 2006. "Australian beach systems—nature and distribution". *Journal of Coastal Research*, 22(1), 11–27.
- Sierra, J.P., Casanovas, I., Mosso, C., Mestres, M. and Sanchez-Arcilla, A., 2016. "Vulnerability of Catalan (NW Mediterranean) ports to wave overtopping due to different scenarios of sea level rise". *Regional Environmental Change*, 16(5): 1457-1468.
- Sierra, J.P. and Casas-Prat, M., 2014. "Analysis of potential impacts on coastal areas due to changes in wave conditions". *Climatic Change*, 124: 861-876.
- *SWASH - User manual*. Delft University of Technology, Environmental Fluid Mechanics Section. Disponible a: <http://swash.sourceforge.net/>
- US Army Corps of Engineering (2008), *Coastal Engineering Manual, Part IV-3 Coastal Morphodynamics*. Disponible a: [http://www.a-jacks.com/Coastal/GeneralInfo/CEM/PartIV\\_CoastalGeology/IV-3\\_Coastal\\_Morphodynamics.pdf](http://www.a-jacks.com/Coastal/GeneralInfo/CEM/PartIV_CoastalGeology/IV-3_Coastal_Morphodynamics.pdf)
- Wright, L.D. and Short, A.D., 1984. "Short-Term Changes in the Morphodynamic States of Beaches and Surf Zones: an Empirical Predictive Model". *Marine Geology*, 62: 339-364.
- Zijlema, M., Stelling, G. and Smit, P., 2011. *Simulating nearshore wave transformation with non-hydrostatic wave-flow modelling*. 12th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting & 3rd Coastal Hazard Symposium. Disponible a: [http://www.waveworkshop.org/12thWaves/papers/Zijlema\\_12thWaveWorkshop\\_Nov2011.pdf](http://www.waveworkshop.org/12thWaves/papers/Zijlema_12thWaveWorkshop_Nov2011.pdf)
- Zijlema, M., Stelling, G. and Smit, P., 2011. "SWASH: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters". *Coastal Engineering*, 58: 992-1012.
- Zijlema, M. and Stelling, G.S., 2008. "Efficient computation of surf zone waves using the nonlinear shallow water equations with non-hydrostatic pressure". *Coastal Engineering*, 55: 780 - 790.

**Pàgines web**

- Banco de datos oceanográficos de Puertos del Estado, Ministerio de Fomento, URL: <http://www.puertos.es/es-es/oceanografia/Paginas/portus.aspx>  
(Consultada el 22/08/2016)
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), URL: <http://www.ipcc.ch/>  
(Consultada el 04/09/2016)
- Wikipedia, Representative Concentration Pathways, URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Representative\\_Concentration\\_Pathways](https://en.wikipedia.org/wiki/Representative_Concentration_Pathways)  
(Consultada el 03/09/2016)