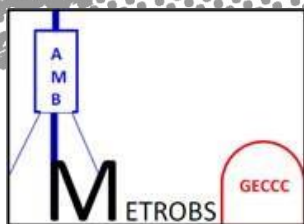


METROBS 2015

EFFECTES DEL CANVI CLIMÀTIC AL LITORAL DE BARCELONA

Octubre 2015



AMB : Àrea Metropolitana
de Barcelona

Treball encarregat per:

Direcció de Serveis Ambientals de l'AMB

Assistència tècnica:

Laboratori d'Enginyeria Marítima – Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)

Taula de continguts

1	INTRODUCCIÓ	3
1.1	Objectius i estructura de l'informe	4
1.2	Equip redactor	4
2	PLATGES ANALITZADES	6
2.1	Platja de Gavà	7
2.2	Platges de Sant Sebastià i Barceloneta	8
3	PORTS DE L'ESTUDI	12
3.1	Port de Badalona	12
3.2	Port Fòrum	13
3.3	Port Olímpic	14
4	ESCENARIS DE CANVI CLIMÀTIC	16
4.1	El nivell mig del mar	16
4.2	L'onatge	16
4.3	Resum d'escenaris hidrodinàmics	17
5	ELS IMPACTES A LES PLATGES	19
5.1	Variables de referència	19
5.2	El model de càlcul	19
5.3	El model de Bruun	22
5.4	La platja de Gavà	23
5.5	La platja de Sant Sebastià i Barceloneta	26
6	ELS IMPACTES ALS PORTS	30
6.1	Variables de referència	30
6.2	El model numèric LIMPORT	31
6.3	El port Olímpic	31
6.4	El port Fòrum	34
6.5	El port de Badalona	38
7	RECOMANACIONS PER A MITIGAR ELS IMPACTES A LES PLATGES	42
7.1	Estratègia general	42
7.2	Recomanacions per a la platja de Gavà	42
7.3	Recomanacions per a la platja de Sant Sebastià i Barceloneta	46
8	RECOMANACIONS PER A ELS PORTS	51
8.1	Estratègia general	51
8.2	Mesures d'adaptació a l'agitació	51

8.3 Mesures d'adaptació a l'ultrapassament	53
9 RESUM	57

ANNEX I. IMPACTE DEL CANVI CLIMÀTIC EN LES PLATGES DE SANT SEBASTIÀ-BARCELONETA I GAVA PER A TEMPORALS AMB PERIODE DE RETORN 1 ANY.

ANNEX II. IMPACTE DEL CANVI CLIMÀTIC EN LES PLATGES DE SANT SEBASTIÀ-BARCELONETA I GAVA PER A TEMPORALS AMB PERIODE DE RETORN 5 ANYS

ANNEX III. IMPACTE DEL CANVI CLIMÀTIC EN LES PLATGES DE SANT SEBASTIÀ-BARCELONETA I GAVA PER A TEMPORALS AMB PERIODE DE RETORN 50 ANYS.

1 INTRODUCCIÓ

El canvi climàtic és un fet cada cop menys qüestionat. L'efecte hivernacle produït per els gasos alliberats per l'acció antròpica està causant un augment de la temperatura de l'atmosfera i un canvi dels patrons climàtics fins ara coneguts. Aquests canvis produiran entre d'altres efectes un augment suau del nivell del mar i un canvi del clima d'onatge (altura d'ona, període i direcció). L'Àrea Metropolitana de Barcelona (AMB) conscient dels possibles efectes sobre la seva costa signa un conveni de col·laboració amb el Laboratori d'Enginyeria Marítima de la Universitat Politècnica de Catalunya (LIM/UPC) amb l'objectiu de:

“Estimar els efectes dels futurs escenaris climàtics per a un conjunt de ports i platges seleccionades, dins l'àmbit de l'àrea Metropolitana de Barcelona, per tal d'avaluar la seva vulnerabilitat als diferents factors oceanogràfics”

Aquest estudi ha de permetre donar un conjunt de recomanacions de caire pràctic orientades a la gestió de les platges i els ports dins l'àmbit de les ordenances municipals.

L'estudi ha estat estructurat en quatre grans fases:

- Fase I: on s'estableix el plantejament general i es determinen els criteris d'estudi per a platges i ports. Es defineixen les platges i ports objectiu i s'analitza el tram de costa on es troben encabides, fent una recopilació de la informació existent.
- Fase II: on es defineixen els escenaris de canvi climàtic cobrint un escenari optimista fins a una situació pessimista.
- Fase III: on s'avalua l'impacte del canvi climàtic sobre platges i ports.
- Fase IV: on es mostren les conclusions més importants assolides en el projecte així com un seguit de recomanacions de gestió.

Aquest informe es correspon amb les Fases II a IV, donat que la Fase I va ser el resultat de reunions dels tècnics de les dues institucions.

1.1 Objectius i estructura de l'informe

Si bé ja ha estat esmentat en la introducció, els objectius del present informe poden resumir-se en:

- Definir els escenaris de canvi climàtic en termes de règim d'onatge i nivell mig del mar, cobrint un escenari optimista fins a una situació pessimista.
- Avaluar l'impacte d'aquests escenaris de canvi climàtic sobre platges i ports.
- Recomanar actuacions per tal de compensar els impactes previstos a platges i ports.

Els capítol 2 i 3 presenten una breu descripció de les principals característiques de les platges i ports d'aquest estudi. En el capítol 4 es defineixen els escenaris de canvi climàtic utilitzats per a ports i platges. En el capítol 5 i 6 s'avaluen els impactes a les platges i ports respectivament. En el capítol 7 es resumeixen les principals conclusions assolides i finalment en el capítol 8 es presenten un seguit de recomanacions per a mitigar els efectes observats.

1.2 Equip redactor

L'equip redactor d'aquest estudi està compost pels membres del Laboratori d'Enginyeria Marítima de la Universitat Politècnica de Catalunya (LIM/UPC) i investigadors del Centre Internacional d'Investigació dels Recursos Costaners (CIIRC) següents:

- Dr. Agustín Sánchez-Arcilla. Enginyer de Camins Canals i Ports, Catedràtic de l'ETSECCPB i director del LIM/CIIRC de la UPC.
- Dr. Joan Pau Sierra, Enginyer de Camins Canals i Ports, Catedràtic de l'ETSECCPB i investigador del LIM/CIIRC de la UPC.
- Dr. Vicenç Gràcia. Geòleg. Professor agregat de l'ETSECCPB i investigador del LIM/CIIRC de la UPC.
- Enginyer Manuel García-León. Enginyer de Camins, Canals i Ports. Investigador del LIM/CIIRC de la UPC.
- Dr. César Möso. Llicenciat en Ciències del Mar. Professor agregat de l'ETSECCPB i investigador del LIM/CIIRC de la UPC.

- Enginyera Jue Lin-Ye. Enginyera de Camins, Canals i Ports de Barcelona i investigadora del LIM/CIIRC de la UPC.

2 PLATGES ANALITZADES

El comportament de la línia de la costa compresa dins la regió de l'AMB així com les seves característiques morfològiques fan convenient la selecció de dos trams de costa totalment diferenciats i que puguin ser representatius dels ambients de platja de la zona. Amb aquest criteri, i d'acord amb el conveni establert entre el LIM/UPC i les reunions mantingudes amb tècnics responsables de l'AMB (LIM, 2014), es van seleccionar les següents platges (Figura 1):

- Platja de Gavà, en la cel·la litoral 8 i referència BLGA030 en l'estudi de l'Estat de la zona costanera a Catalunya, 2010 (CIIRC, 2010).
- Platja de Sant Sebastià i Platja de la Barceloneta, en la cel·la litoral 9, amb referència BABA034 i BAB035 respectivament d'acord amb l'estudi de l'Estat de la zona costanera a Catalunya (CIIRC, 2010).



Figura 1. Platges d'estudi dins l'AMB.

2.1 Platja de Gavà

La platja analitzada té uns 3.65 km de longitud, representa l'arc de transició entre dos alineacions de la costa clarament diferenciades (Figura 2): una al sud (Platja de Castelldefels) amb una orientació de N90E i la platja de Viladecans al Nord amb un angle aproximat de N70E i, per tant, conforma un àpex o sortint exposat a l'acció de les onades. Alhora, la platja de Gavà pot representar-se per un tram Sud d'uns 1.7 km de llarg amb una orientació N83E i un altre al nord d'uns 1.95 km amb una orientació N76E.



Figura 2 Localització de la Platja de Gavà en la cel·la litoral 8.

El domini de càlcul (Figura 3) té una longitud de 3580 m i un ample de 3890 m i es localitza entre el carrers de Llançà i Palafrugell al terme municipal de Gavà. La malla de càlcul és de tipus curvilini, de densitat variable i ha estat construïda a partir de la digitalització de cartes nàutiques i dades cartogràfiques de l'Àrea Metropolitana de Barcelona (AMB) a escala 1:1000.

L'opció de malla curvilínia permet una major captura de les tendències del model digital del terreny amb un número inferior de nodes i amb una mida mitjana de les cel·les de l'ordre de 35 x 35 metres. No obstant, en la zona d'interès, entre la zona de trencament de platja i el sistema dunar de 2m com a màxim de cota de coronació, la densitat de malla és màxima i de 4x10 metres. Les zones urbanitzades (cases, carretera i altres infraestructures) són considerades zones rígides que no poden ser erosionades.

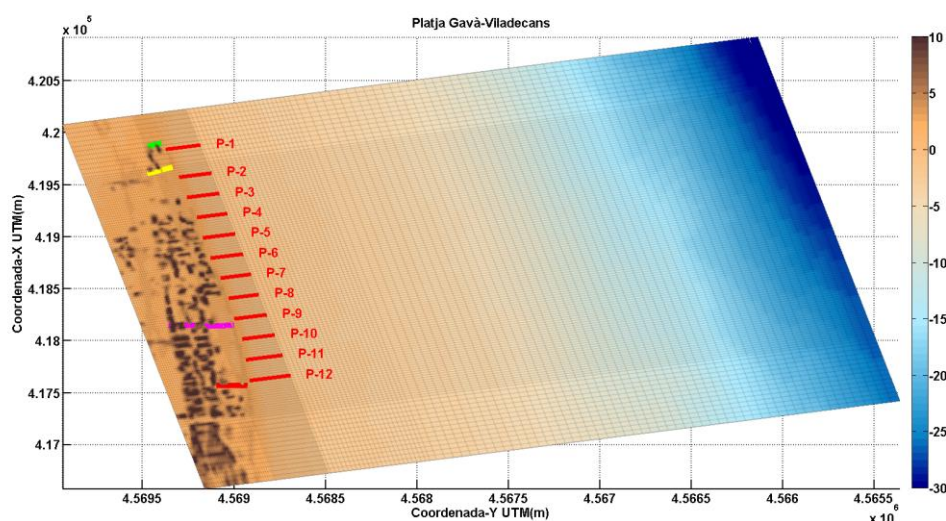


Figura 3. Malla de càlcul entre els carrers de Palafrugell (vermell), C/Roses (magenta); C/L'Escala (groc) i C/Llançà (verd) en el terme municipal de Gavà.

En la **Taula 1** es presenten les característiques principals de les platja a data de 2004 d'acord amb els resultats obtinguts per CIIRC (2010). La mida del sediment de la zona és de l'ordre de 300 μm amb un estat morfodinàmic que es correspon amb una situació modal de platja intermèdia i que, d'acord amb el model de Wright and Short (1984), es correspon amb una situació de dinàmica de barra interna més o menys a prop de la costa en funció de les característiques de l'onatge incident.

2.2 Platges de Sant Sebastià i Barceloneta

Aquestes platges es localitzen entre el Port de Barcelona i l'Espigó del Gas assolint una longitud aproximada de 1175 metres amb un ample variable entre 72 i 16 m de platja emergida (Figura 4).

La batimetria marca unes isòbates irregulars en els primers 10 metres de profunditat donat el complex patró de corrents nearshore existents, originat aquest últim per la presència d'obstacles d'origen antropogènic (dic d'abric del Port de Barcelona, dic exempt en la isòbata -5 metres i espigó del Gas); la isòbata de 40 metres es situa aproximadament a 2 km de la platja.

Taula 1. Característiques principals de la platja de Gavà (valors a data de 2004). (Font: "Llibre verd de l'estat de la zona costanera a Catalunya, 2010", CIIRC).

Platja de Gavà		
AMPLE (m)	mitjà (m)	61
	màxima (m)	100
	mínima (m)	34
ALTURA DE LA BERMA (m)	mitjana (m)	1.4
	màxima (m)	1.9
	mínima (m)	0.8
SEDIMENT	d ₅₀ (mm)	0.390 / 0.307
	σ (mm)	0.094 / 0.130
COMPORTAMENT EVOLUTIU (1995-2004)	evolució mitjana (m/a)	-0.4
	erosió mitjana (m/a)	-0.8
	long. zona d'erosió (m)	2494
	acreció mitjana (m/a)	0.5
	long. zona d'acreció (m)	867
	long. zona d'equilibri (m)	286
ESTAT		
MORFODINÀMIC	Ω	1-2 (Intermedi)
MODAL		



Figura 4. Platges de Sant Sebastià i Barceloneta.

La malla escollida, al igual que Gavà, és de tipus curvilini per tal de caracteritzar de forma adequada la variabilitat morfològica (Figura 5).

Morfològicament, la zona d'estudi és una platja encaixada amb obstacles laterals en les vores i un dic exempt d'uns 157 metres de llarg i 23 metres d'ample. La mida del sediment, tant en la platja emergida com en els primers deu metres de profunditat, s'estableix dintre d'un ordre de $D_{50} = 550 \mu\text{m}$ (CIIRC, 2010).

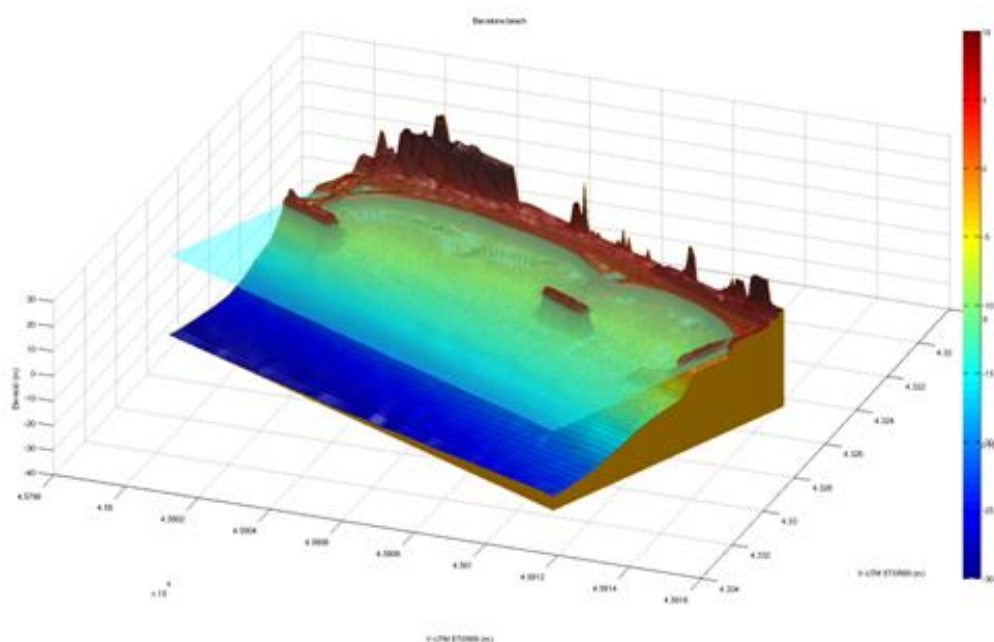


Figura 5. Malla de càlcul de les platges de Sant Sebastià i Barceloneta.

El pendent de la platja és intermedi, dintre de l'escala platja dissipativa - reflectant. El perfil d'equilibri estacional es manté donat l'elevada mida de gra que presenta el sediment. No obstant, els temporals més forts erosionen irreversiblement la zona emergida, essent necessària una alimentació artificial periòdica.

Aquesta platja és especialment vulnerable a l'acció combinada de les onades de temporal i nivells del mar alts donada la seva condició de platja baixa. A més, l'existència d'un dic inicialment exempt i actualment en forma d'espigó en "T" provoca la generació d'una disposició en planta típica de badia d'equilibri generada per l'existència de punts de difracció en els seus contorns. Això fa que les zones centrals de la platja tendeixen a presentar amplexos molt petits (o fins i tot nuls) mentre que el sediment es redistribueix recolzat en els obstacles dels extrems.

El fet de que en la zona els temporals d'onatge (episodis on es mobilitza la major part del sediment) presenten una direcció ENE i NE fa que les platges tinguin una tendència a recolzar-se al sud. Per a la platja de Sant Sebastià, això suposa una potencial acumulació de sediments en el dic de recer del Port de Barcelona, amb la consegüent possible pèrdua de material per aquest extrem.

3 PORTS DE L'ESTUDI

Dins de l'Àrea Metropolitana de Barcelona, a més del port de Barcelona que depèn de l'Autoritat Portuària de Barcelona, hi ha tres petits ports (Figura 6.): Badalona, Port Fòrum i Port Olímpic.



Figura 6. Ubicació dels ports situats dins de l'AMB a més del Port de Barcelona.

En les reunions entre l'AMB i el LIM/CIIRC s'acordà que s'estudiarien els potencials efectes del canvi climàtic sobre els tres ports.

3.1 Port de Badalona

El port de Badalona, ubicat en el municipi del mateix nom, està arrecerat per un dic de dos trams, perpendiculars entre ells de 150 i 700 m de longitud. La superfície total del port és de 300.000 m² amb 202.000 m² de mirall d'aigua i capacitat per a 617 amarradors. La Figura 7 mostra les característiques més rellevants del port.



Figura 7. Port de Badalona

Segons els Pla de Ports 2007-2015 de la Generalitat de Catalunya (2007), el port té problemes operatius degut a l'excessiva agitació interior, motivada per l'orientació de la bocana cap a garbí.

3.2Port Fòrum

El Port Fòrum o Port del Besòs està situat al municipi de Sant Adrià del Besòs i consta de un dic de recer de 803 m de longitud orientat paral·lelament a la línia de costa. Té una bocana de 8 m de calat i una superfície total de 255.031 m², dels quals 164.737 m² són de mirall d'aigua, podent acollir fins a 501 embarcacions. La Figura 8 mostra la planta del port.

Aquest port, des de la seva entrada en servei l'any 2005, ha mostrat freqüents problemes d'agitació interior, a més d'ultrapassaments en casos de grans tempestes. De fet, el LIM/CIIRC ha participat en diversos estudis tendents a tractar de trobar solucions a aquests problemes.

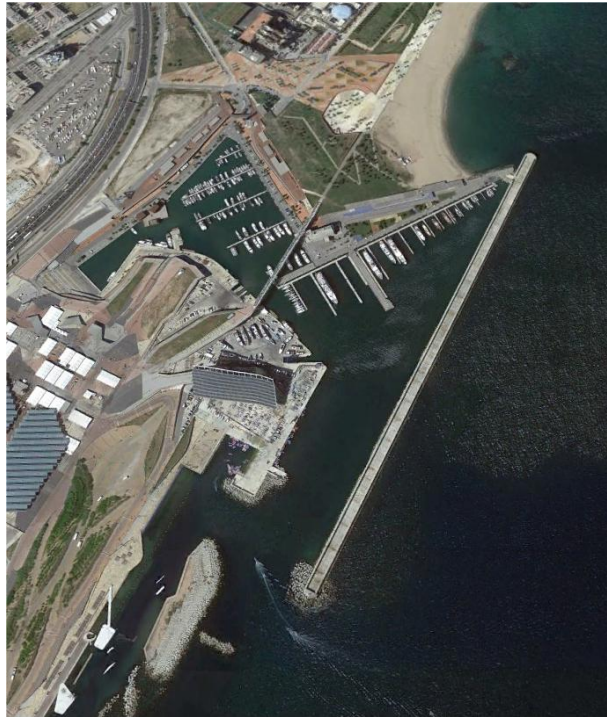


Figura 8. Port Fòrum o Port del Besòs

3.3Port Olímpic

Finalment, el darrer port que s'estudiarà és el Port Olímpic, que està situat davant de la vila Olímpica, a la ciutat de Barcelona. El port té un dic amb dues alineacions, una recta i perpendicular a la costa de 320 m i una corba de 550 m. A més té un contradic perpendicular a la costa de 160 m de longitud. El port té una superfície total de 180.175 m², dels quals 82.533 m² són de mirall d'aigua i una capacitat de 740 amarradors. La Figura 9 mostra la distribució en planta del port.

En l'actualitat pateix problemes d'ultrapassaments durant les grans tempestes i d'aterraments a la bocana donada la dinàmica de la platja adjacent al sud (platja del Somorrostro) que pot reduir el seu calat fins a 3 m.

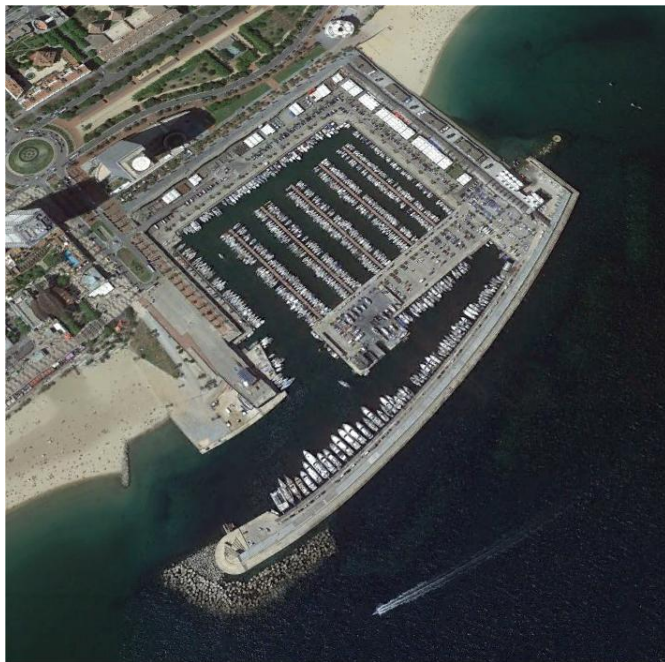


Figura 9. Port Olímpic.

4 ESCENARIS DE CANVI CLIMÀTIC

4.1 El nivell mig del mar

S'ha considerat la situació actual com escenari base o situació de partida, utilitzant les batimetries disponibles i considerant una pujada del nivell del mar de 0 m.

Es suposa una pujada del nivell del mar d'acord amb les estimes realitzades per l'IPCC (2013) i adaptades al Mediterrani. Aquestes estimes es corresponen amb la banda central de l'escenari RCP4.5, una altra amb el valor superior de l'escenari RCP8.5. Finalment es considera un escenari extrem (*high-end scenario*) molt superior a les previsions de l'AR5. Això es degut a que hi han estudis (Mori et al., 2013 entre d'altres) que suggereixen pujades de fins 1.86 m i que indiquen que una pujada tan extrema del nivell del mar és físicament possible, encara que amb una probabilitat d'ocurrència molt baixa (de l'ordre del 5%) però no menyspreable (Jevrejeva et al., 2014).

Els valors que dona l'IPCC són valors mitjos globals. Si bé encara no hi ha projeccions detallades a escala regional, si que es pot dir que a l'informe del IPCC (2013) els mapes de pujada del nivell del mar indiquen que les projeccions per a la Mediterrània mostren pujades lleugerament inferiors a les mitjanes globals, de fins a un 10% de diferència. Tenint en compte aquesta reducció de l'ordre del 10% a la Mediterrània en relació a la pujada mitja global, els escenaris considerats en aquest estudi són: (i) Escenari 0: Condicions actuals, (ii) Escenari 1: RCP4.5 (escenari 0 + 0.47 m), (iii) Escenari 2: RCP8.5 (escenari 0 + 0.88 m) i (iv) Escenari 3: Escenari extrem HES (escenari 0 + 1.80 m).

4.2 L'onatge

Es consideren dos grans bases de dades d'onatge: (i) la base de dades present que representa l'estat actual i (ii) la base de dades futura, obtinguda a partir de les prediccions obtingudes amb models numèrics fins a l'any 2100, que reflecteix els canvis en la intensitat, període i direcció de les ones degut a l'efecte hivernacle.

Aquest segon conjunt de dades han estat generades amb el model WAM a partir de l'escenari RCP8.5 de l'AR5. Aquesta base conté simulacions de les condicions d'onatge entre 1950 i 2100 amb una resolució temporal de 3 h.

Els processos seleccionats per a determinar l'efecte del canvi climàtic en platges i ports són: la erosió, la inundació, l'ultrapassament sobre els dics i l'agitació portuària. En els següents capítols s'expliquen de forma detallada com han estat avaluats. Aquestes perillositats requereixen la definició de dos règims d'onatge diferents: el règim d'extrems i el règim mitjà. El règim d'extrems descriu la probabilitat d'aparició dels temporals mentre que en el règim mitjà es defineixen les condicions considerades típiques anuals.

El règim de temporals ha estat obtingut de manera escalar (sense tenir en compte la direcció) tant per a la base de dades Present com Futura i ve definit pels períodes de retorn de 1 any, 5 anys i 50 anys.

El clima mitjà determina els coeficients de direccionalitat de l'onatge (coeficient multiplicador sobre els resultats escalars) a assignar per a cada una de les direccions d'interès i, al igual que el cas anterior, ha estat obtingut tant per condicions Presents com per a la situació Futura. Aquest clima mitjà s'ha utilitzat també per estudiar l'agitació als tres ports.

4.3 Resum d'escenaris hidrodinàmics

En la **Taula 2** es presenten les diferents combinacions d'onatge extrem i nivell del mar per a les perillositats analitzades. Aquests escenaris s'analitzen per a la base de dades Presents i base de dades Futura.

Taula 2. Escenaris hidrodinàmics per a les diferents perillositats considerades en aquest estudi (E: Erosió de platja; I: Inundació de la costa; U: Ultrapassament del dic de recer)

		Nivel Mig del Mar (m)			
		0	0.47	0.88	1.8
Període de Retorn (anys)	1	E/I/U	E/I/U	E/I/U	E/I/U
	5	E/I/U	E/I/U	E/I/U	E/I/U
	10	E/I/U	E/I/U	E/I/U	E/I/U

Cal tenir en compte que aquestes condicions són genèriques i que s'analitzen de forma particular per a les diferents direccions d'onatge d'interès. Es a dir, el número de casos analitzat és sempre un múltiple de 12. D'altre banda, la condició de nivell del mar 0 es considera com a situació de referència.

A més del clima extremal, s'han considerat les condicions presents i futures del clima mitjà per dur a terme l'estudi d'agitació portuària. A la Figura 10. es mostren les roses d'onatge utilitzades i que representen el clima mitjà present i futur.

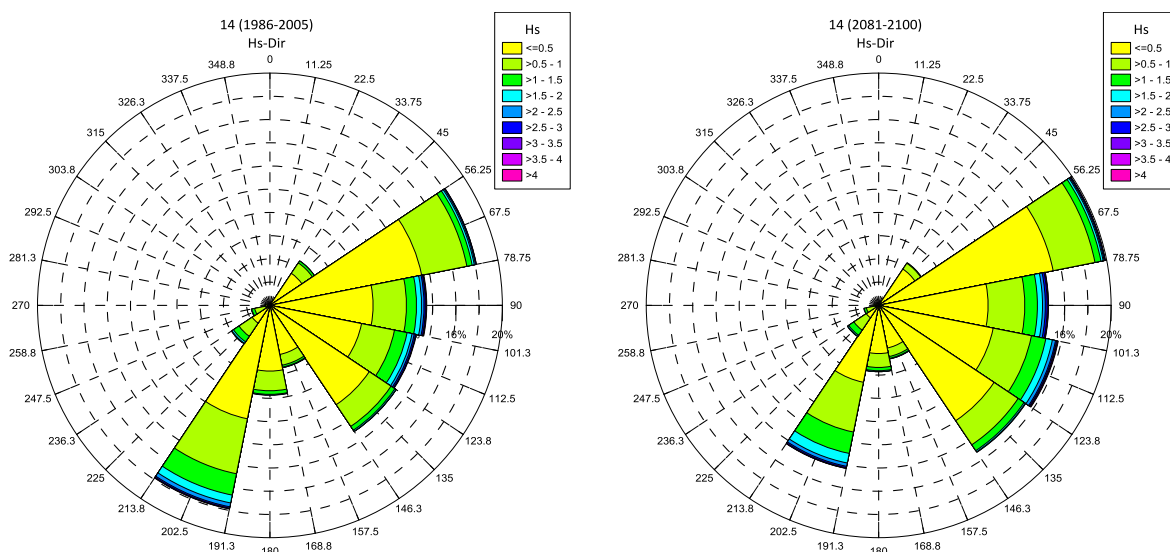


Figura 10. Roses d'onatge del clima mitjà per a condicions present i futures

Pot apreciar-se com les condicions futures portaran una disminució de la freqüència dels onatges de component Sud (SSE a SW), mentre que la dels de component Est (ENE a SE) augmentarà.

5 ELS IMPACTES A LES PLATGES

5.1 Variables de referència

D'acord LIM (2014) les variables a analitzar per a determinar l'efecte del canvi climàtic a les platges són l'erosió/acumulació i la inundació.

L'erosió/acumulació es considerada com el canvi morfològic de les platges donada una acció incident. Aquest procés contempla un gran rang tant d'escala espacials com temporals. En aquest informe, però, ens hem basat en l'erosió/acumulació de caire episòdic, donat per events extrems. Aquesta restricció ve donada perquè aquests episodis són els responsables de més del 90% del transport de sediment potencial (Jimenez et al., 1997).

La inundació és definida per l'ocupació transitòria de la zona emergida per una làmina d'aigua que pot esdevenir perjudicial per als éssers vius, infraestructures i/o ecosistemes, donat el seu calat i/o la seva velocitat. Normalment, els períodes de màxima inundació estan associats als mateixos events extrems que l'erosió episòdica. En aquest estudi, doncs, s'ha considerat com zona inundada, tota aquesta on la làmina d'aigua supera els 5 cm durant un mínim de 15 minuts. Cal a dir que, en escenaris de canvi climàtic, la inundació ve donada per dos components: una component "estàtica" (increment de la pujada del nivell del mar) i una component "dinàmica" (run-up, wave set-up i wind set-up).

La determinació d'ambdós fenòmens es pot estimar amb models numèrics bidimensionals que resolguin la hidrodinàmica fonamental a la zona nearshore (vora la platja). Aquesta zona és altament dinàmica i coexisteixen una sèrie d'interaccions, que requereixen resoldre processos hidrodinàmics i morfodinàmics de forma acoblada. Conseqüentment, aquesta ha estat la nostra hipòtesi de partida per escollir el model XBEACH (Roelvink et al., 2009) com a eina d'avaluació de l'impacte.

5.2 El model de càlcul

L'avaluació de l'erosió i inundació per als diferents escenaris de canvi climàtic ha estat realitzat mitjançant una versió adaptada del model numèric XBEACH (Roelvink et al.,

2009). El model XBEACH neix dintre del marc de la modelització dels processos hidrodinàmics i morfodinàmics d'episodis extrems, en un domini d'àmbit litoral, especialment entre la zona de batuda de les ones i la part emergida de la platja, reproduint els processos en un domini 2DH (flux bidimensional amb la profunditat mitjana). El sistema es fonamenta en dos blocs acoblats diferenciats: el bloc hidrodinàmic i el bloc morfodinàmic (Figura 11). En primer lloc es calcula l'acció de l'onatge de curt període en el domini amb el balanç d'acció d'onatge (Holthuijsen et al., 1993) en una escala temporal de grup d'ones (propagació). A partir d'un cert llindar, es considera l'efecte de l'onatge trencant en aigües someres mitjançant un balanç d'energia d'ones trencant (Stive and Dingemans, 1984).

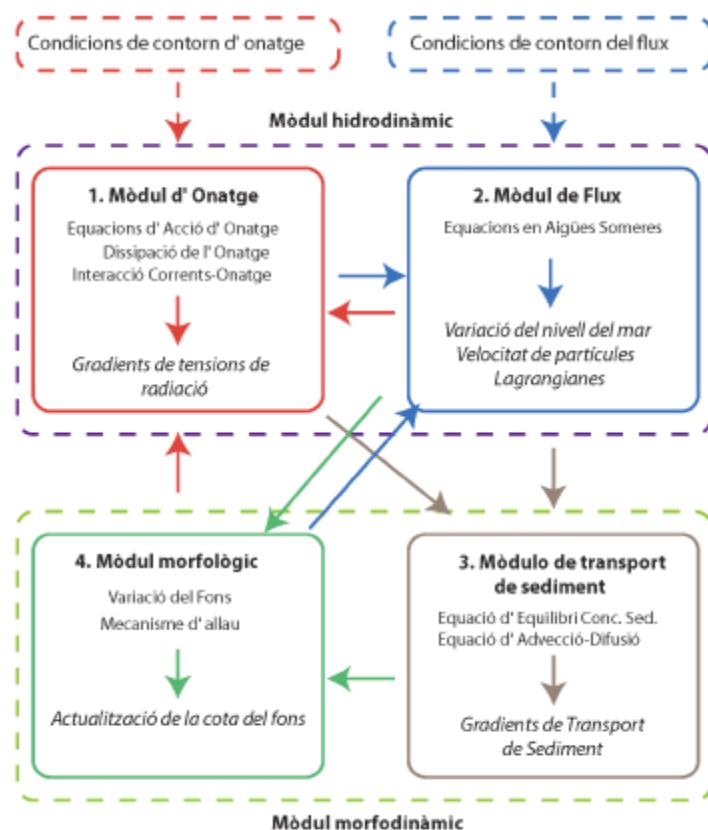


Figura 11. Algorisme d'interacció dels diferents mòduls interns de XBEACH

Les forces d'onatge obtingudes (variables a escala temporal de grup d'ones) actuen com a terme font en les equacions diferencials en aigües someres no lineals. El flux de massa d'onatge contribueix al moviment d'ones llargues. També es té en compte el flux mig en direcció a mar obert (corrents de ressaca). Amb els camps hidrodinàmics obtinguts, entra en acció el mòdul morfològic. Aquest es basa en la formulació de van Rijn (2007) pel

càlcul de les concentracions d'equilibri de sediment, actuant en el terme font en les equacions d'advecció-difusió (Galapatti, 1983). Finalment, els canvis en el fons es calculen mitjançant gradients de transport de sediment. En contrapartida, la nova batimetria afecta en el pas següent a l'acció de l'onatge, corrents i dinàmica litoral com a conseqüència de la retroalimentació pròpia de l'algorisme.

5.2.1 Hipòtesi de càlcul i parametritzacions

La modelització parteix de dos configuracions del model independents, donats els processos físics locals que hi succeeixen.

En el cas de la platja de Gavà, que és una platja oberta sense obstacles, s'ha emprat l'esquema complet del model XBEACH, resolent l'acció de l'onatge mitjançant el balanç de l'acció (Holthuijsen et al., 1993). Aquesta hipòtesi permet un estalvi computacional considerable, ja que el pas de temps pot esdevenir a un promig a escala de grup d'ones.

En canvi, en el cas de la platja de Sant Sebastià (Barcelona), la presència d'obstacles (dic de baixa coronació, espigó del Gas, efecte barrera del Port de Barcelona en el contorn lateral sud), demanden que les equacions de flux siguin resoltes “ona a ona” i considerant un terme addicional no-hidrostàtic (Zijlema and Stelling, 2008). Amb aquest esquema es poden aproximar els fenòmens de difracció, transmissió parcial i reflexió, que alteren notablement el patró hidrodinàmic i, en conseqüència, la dinàmica sedimentària. No obstant, això implica un major cost computacional i una demanda de major resolució espacial, donat que es requereix una densitat de malla més fina (per tal de capturar la propagació d'ones individuals, les quals tenen una menor longitud d'ona que no pas un grup d'ones) i en contrapartida un menor pas de temps per tal d'assolir criteris d'estabilitat numèrica (i.e. número de Courant-Friedrich-Levy).

5.2.2 Característiques dels temporals

La caracterització morfodinàmica de les platges requereix la definició dels temporals de càlcul en termes d'evolució en el temps. Com a criteri general s'ha definit un temporal amb una durada de 24 hores i una distribució de les variables triangular amb el màxim a les 12 hores (Figura 12).

El nivell mig del mar i la direcció d'onatge es consideren constants al llarg del temporal. El període de l'onatge ve donat a partir d'un ajust exponencial amb l'alçada d'ona significant.

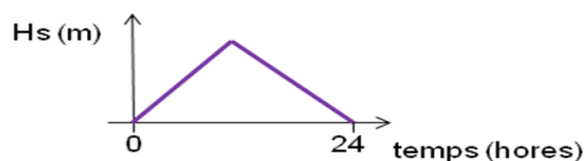


Figura 12. Variació en el temps d'un temporal típic

5.2.3 Resum de les simulacions realitzades per al càlcul de l'impacte a les platges de Sant Sebastià/Barceloneta, Gavà.

En la *Taula 3* Es presenten les direccions d'onatge efectives, es a dir amb una incidència directa, a les platges d'aquest estudi. Així doncs, per a la platja de Sant Sebastià / Barceloneta s'han analitzat 36 casos. En el cas de la platja de Gavà ha calgut un total de 48 passes del model per tal de determinar quins han estat els impactes. Per tant el nombre total de casos simulats per a determinar l'impacte del canvi climàtic a les platges de l'àmbit de l'AMB és de 84.

Taula 3. Direccions d'onatge utilitzades per a la determinació dels impactes a les platges de Sant Sebastià / Barceloneta i Gavà.

		PRESENT	ESCENARIS DE CANVI CLIMÀTIC		
			RCP 4.5	RCP 8.5	High End
		(0m)	(0.47m)	(0.88m)	(1.8m)
Tr=1 yr	BCN	E, ESE, SE	E, ESE, SE	E, ESE, SE	E, ESE, SE
	GAVÀ	SE. SSE, S, SO	SE. SSE, S, SO	SE. SSE, S, SO	SE. SSE, S, SO
Tr=5 yr	BCN	E, ESE, SE	E, ESE, SE	E, ESE, SE	E, ESE, SE
	GAVÀ	SE. SSE, S, SO	SE. SSE, S, SO	SE. SSE, S, SO	SE. SSE, S, SO
Tr=50 yr	BCN	E, ESE, SE	E, ESE, SE	E, ESE, SE	E, ESE, SE
	GAVÀ	SE. SSE, S, SO	SE. SSE, S, SO	SE. SSE, S, SO	SE. SSE, S, SO

És important recordar l'alt grau de detall que s'assoleix amb aquest tipus d'aproximacions, si bé presenten un elevat cost computacional i de l'ordre d'un dia per a cada cas.

5.3 El model de Bruun

Finalment s'ha volgut tenir una estima de l'efecte del nivell mig en l'erosió aplicant el model proposat per Bruun (1962, 1968). Aquest model, àmpliament utilitzat a l'hora de

determinar els impactes a gran escala (canvis que afecten desenes de kilòmetres de costa) suggereix l'existència d'un perfil en equilibri (invariant respecte l'onatge incident) que respon aixecant-se i retrocedint (Figura 13) en produir-se un augment del nivell mig del mar. L'evidència d'aquest comportament ha estat contrastada amb el comportament de platges barrera al llarg del registre geològic i molt especialment durant el període Holocè (Schwartz i Fisher, 1980).

Aquest tipus de comportament no és a priori assumible en la majoria de platges de Catalunya donat l'elevat grau d'ocupació que presenten i, per tan, els seus efectes seran els d'una erosió de la costa proporcional a la magnitud de la sobreelevació.

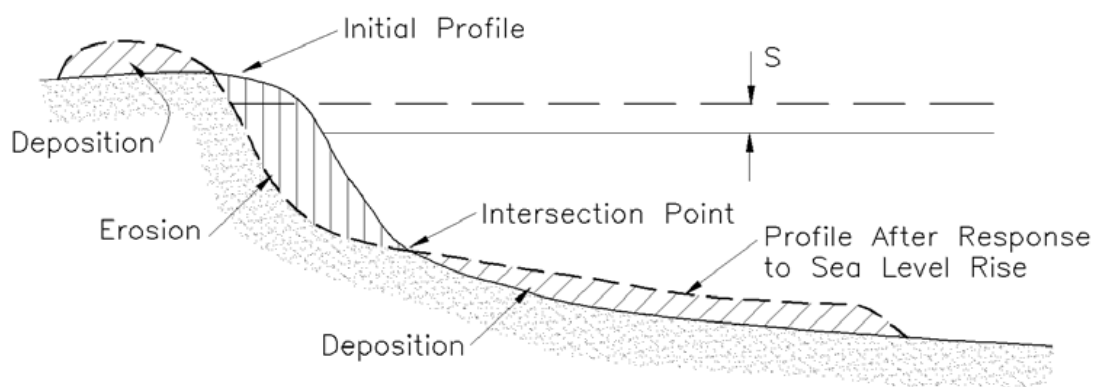


Figura 13. Resposta d'un perfil de platja en equilibri vers un ascens del nivell mig del mar segons Brunn (1962).

A aquesta escala el perfil d'una platja sempre és descrit com un perfil d'equilibri es a dir, la seva forma s'ha adaptat a l'energia transversal incident i no experimenta canvis. Existeixen molts models per descriure aquesta forma si bé un dels més utilitzats es deu a Dean (1977).

El perfil d'integració d'aquests canvis han estat els de la fondària activa definida en CIIRC (2010) i la cota del passeig de la part posterior de les platges.

5.4 La platja de Gavà

En els annex I, II i III es presenten els resultats obtinguts per als períodes de retorn de 1, 5 i 50 anys respectivament. L'anàlisi de l'erosió i inundació ha estat realitzat considerant 4

direccions diferents: SE, SSE, S i SSW d'acord amb el règim d'onatge. Cada sector direccional s'ha modelat amb 3 categories de període de retorn: 1, 5 i 50 anys i 4 escenaris de pujada del nivell del mar: sense canvis (0 cm), RCP 4.5. (47 cm), RCP 8.5 (88 cm) i high-end scenario (180 cm).

En el cas de situació sense pujada del nivell del mar, donat que el sector direccional en el sector SSW és el que té una major magnitud, l'impacte tant de la inundació com l'erosió és superior a la resta de sectors. En contrapartida, el sector SE és el que menors conseqüències té envers fenòmens extrems. Prova d'això és que la magnitud del patró erosió/sedimentació, inclòs per a períodes de retorn de 50 anys, és sensiblement inferior als altres sectors direccionals.

No obstant, un cop es considera un increment del nivell del mar de 0.47 cm (equivalent a RCP 4.5. a l'any 2100), el factor dominant tant per inundació com erosió esdevé el nivell mig. La influència dels diferents sectors direccionals perd transcendència un cop la pujada del nivell del mar guanya en importància. Aquesta tendència ve donada pel comportament dissipatiu que presenta aquesta platja: les ones han patit una important dissipació per trencament prèviament a arribar a la part emergida i tenen una capacitat de mobilització de sediment inferior. En canvi, la pujada del nivell del mar implica que perfils de platja, adaptats a zona emergida, passin a zona submergida, essent reconfigurats amb l'onatge incident. Els baixos calats que hi ha en la zona inundada, impliquen alts mòduls de velocitat capaços de mobilitzar sediment. Però, com s'ha esmentat, aquesta component mobilitzadora ve donada per la conjunció d'un talús propi de zona emergida (amb més pendent) inundat, donada la pujada del nivell del mar i sotmès a onatge (parcialment dissipat, però de caire extremal) que facilita aquest comportament clàssic de perfil (Vellinga, 1986).

Cal mencionar, però, que la principal línia de defensa de la platja, el cordó dunar existent (línia verda en totes les figures) no es superat inclús amb alts períodes de retorn (50 anys), concloent que el sistema dunar actual té capacitat resistent per suportar nivells de fins 47 cm. Segons l'escala de (Sallenger, 2000), aquest comportament hidrodinàmic estaria en règim de col·lisió.

No obstant, en l'escenari RCP 8.5. (88 cm d'increment del nivell del mar) aquesta línia de defensa és superada a la part Nord (carrer de Llançà i carrer de Premià) i en la part

central (Gavà Mar) de la platja quan l'onatge incident és de SSW, amb un període de retorn de 50 anys. En aquest cas particular, l'alt nivell del mar, en conjunció amb el run-up i wave set-up, provoquen suficient sobrelevació per tal de produir ultrapassament al cordó dunar. Amb aquestes condicions hidrodinàmiques, el cordó pot estar parcialment o totalment col·lapsat en certes zones puntuals. No obstant, tal com es pot veure amb la resta d'onatges, tant d'altres sectors com de magnituds inferiors, la reposició de la zona dunar present implicaria una configuració de platja que, si bé tindria un ample de platja insuficient des de el punt de vista recreatiu, seria encara capaç d'assolir la funció de protecció del hinterland present.

L'escenari high-end té associat un nivell del mar (1.80 m) amb una alçada suficient per col·lapsar el cordó dunar en la seva totalitat. Per a totes les direccions, la platja és totalment inundada i la urbanització a primera línia de mar és inundada. En la part Nord, que ja era parcialment inundada sota l'escenari RCP 8.5. amb els onatges més extrems, ara és inundada amb calats importants amb ones de menor magnitud. En aquest cas, poc probable, però possible, el nivell del mar és l'agent hidrodinàmic principal.

Si es considera l'efecte a llarg termini sobre la platja (Taula 4) es pot veure que es requereixen de l'ordre de $2 \text{ m}^3/\text{m l./a}$ de sediment per tal de compensar el retrocés de 0.47 m (RCP 4.5) a l'any 2100. Si aquest s'integra en la totalitat de la platja es requeriran un total de 75.000 m^3 de sorra a l'any per a contrarestar aquest efecte per a la totalitat de la platja. Com era d'esperar, un augment del nivell del mar comporta una major pèrdua fins arribar a presentar aportacions de $7 \text{ m}^3/\text{m l./a}$ en el cas més desfavorable o el que és el mateix, realitzar una aportació periòdica de 25.500 m^3

Aquest resultats cal que siguin presos amb precaució doncs parteixen d'hipòtesi molt generals. Una de les simplificacions del problema es assumir un comportament homogeni de la resposta del perfil, es a dir, el retrocés es dona igual en qualsevol punt fins a la fondària activa. No obstant, si s'assumeixen que els canvis disminueixen amb la fondària (distribució triangular de la resposta), els valors prèviament obtinguts disminueixen a la meitat. Aquesta incertesa en els càlculs implica que, a efectes pràctics, sols puguem donar un ordre de magnitud de les implicacions i que per al cas de la platja de Gavà situaria els efectes en l'ordre de $1 \text{ a } 3 \text{ m}^3/\text{m l./a}$ per tal de compensar aquest ascens.

Taula 4. Erosió a llarg termini donat l'ascens del nivell del mar i paràmetres utilitzats per a la platja de Gavà.

	Gavà		
SLR any 2100 (m)	0.47	0.88	1.8
D50 (m)	0.00039	0.00039	0.00039
Paràmetre A Dean	0.14	0.14	0.14
Fondària activa (m)	6.35	6.35	6.35
Berma Activa (m)	0.8	0.8	0.8
Ample platja emergida mig (m)	10	10	10
Ample efectiu (m)	315	315	315
Longitud de la Platja	3640	3640	3640
Retrocès a l'any 2100 (m)	20.7	38.8	79.3
Taxa anual retrocès (m/a)	0.24	0.46	0.93
Vol erosió (m3/a)	2	3	7

5.5 La platja de Sant Sebastià i Barceloneta

L'anàlisi de l'erosió i inundació ha estat realitzat considerant 3 direccions diferents: E, ESE i SE d'acord amb el règim d'onatge. Cada sector direccional s'ha modelat amb 3 categories de període de retorn: 1, 5 i 50 anys i 4 escenaris de pujada del nivell del mar: sense canvis (0 cm), RCP 4.5. (47 cm), RCP 8.5 (88 cm) i high-end scenario (180 cm).

Aquesta platja té un sediment més groller que en la platja de Gavà i per tant, el comportament de la platja no és tan dissipatiu. Les tres estructures existents (Espigó del Gas a la part Nord, dic exempt en la part central i dic de recer del Port de Barcelona) tanquen la cel·la litoral. La línia vermella present a totes les Figures de l'Annex 1 conforma el límit de la zona emergida de la platja

Donades les condicions d'onatge futures (Figura 10.), les components Est (ENE a SE) augmentaran. No obstant, no tot aquest rang entra dins del rang de direccions efectives per a la platja. L'orientació de la línia de la costa esdevé de manera que les components seleccionades (E, ESE i SE) són les que incideixen amb una important component transversal. D'aquestes tres, la que té un major pes en l'onatge extrem és la condició de Llevant, que si bé perd freqüència en l'onatge mitjà (0 a <2 m) d'alçada d'ona significant (H_s), no passa així en les condicions extremals ($H_s > 2$ m). En definitiva, el sector direccional on es mostra una major afectació per la inundació i l'erosió és el sector Est,

seguit del sector ESE. El sector SE, a més de tenir onatges de magnitud inferior, entraria dins d'un sector en el que els obstacles presents actuen com elements de protecció.

Es poden descriure tres comportaments fonamentals:

- (i) En la part Nord de la platja, amb un ample limitat es troba el tram més erosiu i més vulnerable envers els agents extrems. En un escenari sense pujada del nivell del mar però amb un alt període de retorn l'ample post-temporal seria insuficient. El material erosionat a la part emergida es conduït a profunditats de fins a 5 m.
- (ii) En la zona d'ombra del dic exempt, el sediment de la part emergida i part del material erosionat en els laterals s'acumula a baixos calats (entre la -1 i -4 m), contribuint a la formació del tómbol. Vegeu les importants acumulacions (color vermell) al costat terra del dic exempt.
- (iii) En la part Sud de la platja, el punt més feble és la part central, on hi ha un ample de platja menor. Aquest punt, és el que està més sotmès a l'acció de l'onatge. Al igual que en les altres dues zones, la sorra erosionada en la part emergida és acumulada a profunditats entre la 0 i la -3 m.

La condició més desfavorable de diagnòstic és la d'un onatge de període de retorn de 50 anys. Per tant, a continuació, es farà especial èmfasi donada la seva importància com a condició límit tant de determinació d'impactes, com de disseny d'estratègies de gestió.

Amb un nivell del mar com l'actual, la part central del tómbol és la part més protegida envers la inundació d'origen marí. La franja d'alts calats (superior a 1 metre) està focalitzada en els punts més sensibles de les subzones nord i sud. La zona sud, a l'ésser molt més ampla i oberta, permet una major entrada de flux de massa hidrodinàmic i, per aquesta raó, els calats són superiors propers a la vora del mar.

En l'escenari RCP 4.5 es pot apreciar que en el cas de l'onatge de l'Est, la làmina d'inundació arriba a posicions semblants en la part Nord, però amb calats notablement més alts. En la part central també es localitza un increment de la zona afectada, així com la seva categoria. No obstant, en la part Sud, donat l'increment del nivell, el flux hidrodinàmic arriba terra endins, amb calats de l'ordre de 20-40 cm prop de la zona límit. Els onatges dels sectors ESE i SE mostren una menor inundació que el cas E, i els patrons d'erosió-sedimentació es comporten de forma proporcional.

L'escenari RCP 8.5. té un nivell del mar de 0.88 m a l'any 2100. Aquest nivell implica que la zona inundada pels temporals de Llevant guanya en magnitud, amb calats que superen 1.5 metres en gran part de la zona emergida. La subzona Nord té un ample de platja pràcticament nul i la subzona Sud pateix erosions en gran part de la seva extensió. El material erosionat roman a profunditats semblants que els casos amb menors increments del nivell del mar (0 a -3 m), malgrat existir-hi una major mobilització.

En l'escenari high-end (1.8 metres), la totalitat de la platja és inundada per al cas de Llevant. Un important flux de massa entra dintre del barri de la Barceloneta, superant la última línia de defensa en tot el tram Sud. Els calats superen els 2 metres en gran part de la zona emergida. Tal com passava amb els altres casos, el sediment queda retingut entre les isòbates 0 i -3m. En el cas d'ESE, la part Nord queda totalment inundada amb un ample de platja pràcticament nul. No obstant, en la part Sud, no hi ha superació de la làmina d'aigua envers el límit de la platja emergida. Inclús amb aquests alts nivells del mar, el percentatge d'àrea inundada amb el cas d'onatge SE està en una situació intermèdia entre el temporal de Llevant sense pujada del nivell del mar i amb un RCP 4.5.

Els resultats obtinguts en les simulacions indiquen que, en el cas de la platja de Sant Sebastià, l'onatge és l'agent hidrodinàmic principal a alts períodes de retorn. Els alts nivells del mar contribueixen a augmentar la magnitud de la inundació/erosió, però el comportament intermedi del perfil de platja implica una morfodinàmica on el transport de fons té major importància que en Gavà. Prova d'això és que, malgrat les diferències de magnitud en els forçaments hidràulics, el sediment té tendència a acumular-se entre la línia de la costa i la isòbata 3 m, en comptes de propagar-se de forma més homogènia en tota la cel·la activa.

En la situació de diagnòstic s'ha determinat que la platja de Sant Sebastià té dos problemàtiques associades: en la part Nord, la manca d'ample de platja provoca que hi hagi una major inundació de la zona emergida, provocant que la làmina d'inundació arribi a la zona del passeig marítim. La subpartició té un comportament altament erosiu, a més d'un grau de desacoblament de la dinàmica litoral, donada la presència del espigó del Gas i el semitòmbol originat a la platja de Sant Sebastià. Conseqüentment, els temporals de mar mobilitzen el sediment de la part emergida en direcció mar endins, dificultant la seva recuperació.

La part Sud, té un comportament similar, amb un punt crític que és el punt mig d'aquest subdomini, que és on hi ha un menor ample de platja. En els resultats de les simulacions, aquesta zona té tendència a patir erosió donat la conjunció de la difracció de l'onatge causada pel dic del Port de Barcelona i el dic exempt, a més de la important component transversal que esdevé en la zona durant temporals de mar.

En ambdues zones, l'efecte de la pujada del nivell del mar reforça aquests patrons: en primer lloc, hi ha una pèrdua de zona emergida (de defensa) actual; i en segon lloc, al incrementar-se notablement el calat, les ones tendeixen a trencar més terra endins. Això pot induir a una menor dissipació per trencament, incrementant el pes del tensor de radiació de l'onatge en els balanços de momentum. Aquest major pes del tensor de radiació comporta un major transport de sediment i, en conseqüència, una pèrdua de la resiliència a la zona.

Si tan sols es consideren els efectes del augment del nivell del mar (Taula 5) s'observa com les platges de Sant Sebastià i Barceloneta experimenten un retrocés de 11 m, 21 m i 43 m per als escenaris de 0.47m, 0.88 i High-End de pujada del nivell mig del mar. Aquests retrocessos impliquen una taxa d'erosió 1 i 4 m³/a per metre de costa en el cas de considerar un comportament homogeni o de entre 0.5 i 2 m³/a en el cas d'assumir una variació lineal amb un màxim a la línia de la costa i nul·la a la fondària activa.

Taula 5. Erosió a llarg termini donat l'ascens del nivell del mar i paràmetres utilitzats per a la platja de Sant Sebastià i Barceloneta.

	BCN		
SLR any 2100 (m)	0.47	0.88	1.8
D50 (m)	0.000878	0.000878	0.000878
Paràmetre A Dean	0.2	0.2	0.2
Fondària activa (m)	6.35	6.35	6.35
Berma Activa (m)	1.6	1.6	1.6
Ample platja emergida mig (m)	10	10	10
Ample efectiu (m)	189	189	189
Longitud de la Platja	1175	1175	1175
Retrocès a l'any 2100 (m)	11.2	20.9	42.8
Taxa anual retrocès (m/a)	0.13	0.25	0.5
Vol erosió (m ³ /a)	1	2	4

6 ELS IMPACTES ALS PORTS

6.1 Variables de referència

Les variables de referència per estudiar el canvi climàtic als ports són l'agitació interior i l'ultrapassament del dic de recer.

Per agitació interior s'entén l'altura d'ona significant (Hs) que es registra a cada punt de l'interior del port. Per avaluar-la, l'onatge del clima mitjà s'agrupa per direccions (16 sectors de 22.5°) i rangs d'altura d'ona (0-1 m, 1-2 m, 2-3 m, 3-4 m i >4 m), determinant la freqüència de presentació de cada onatge, per a condicions present i futures. Cadascun d'aquests onatges es propaga cap a l'interior del port mitjançant un model numèric d'agitació portuària, el LIMPORT, que permet calcular la Hs a cada punt del port. Multiplicant les Hs obtingudes per a cada onatge per la seva freqüència de presentació, s'obté la Hs promig anual a cada punt del port, per a condicions presents i futures. Comparant ambdues, es pot estimar la magnitud del canvi de l'agitació en el futur.

Per ultrapassament s'entén el cabal d'aigua que passa per sobre del dic de recer com a conseqüència del trencament de les ones i la remunta que es produeix sobre aquest dic. La magnitud d'aquest cabal es determina utilitzant les fórmules empíriques incloses al Manual Europeu d'Overtopping (EurOtop). En l'estudi s'ha assumit que l'onatge no varia en el futur i s'han definit els valors tolerables d'ultrapassament per a cada port, en funció de les activitats que es porten a terme al costat interior del dic de recer i considerant que no es permeten activitats ni la presència de vianants en les àrees exposades durant les grans tempestes. Tenint en compte això s'han considerat uns cabals d'ultrapassament tolerables de 10 l/s/m al Port Olímpic i al Port de Badalona i un cabal de 200 l/s/m al Port del Besòs. Això és així perquè, als dos primers ports, hi ha embarcacions amarrades al moll adossat, mentre que al darrer, no hi ha res de valor darrere el dic de recer i aquest valor és el que correspon al flux que podria produir danys en l'estructura.

Els cabals d'ultrapassament s'han calculat per a diferents períodes de retorn T_r : 1 any corresponent a tempestes relativament freqüents, 5 anys per a tempestes relativament intenses i 50 anys per a tempestes excepcionals, amb els valors de la boia de Barcelona de Puertos del Estado.

6.2 El model numèric LIMPORT

El model emprat per portar a terme les simulacions és el LIMPORT, desenvolupat al Laboratori d'Enginyeria Marítima de la Universitat Politècnica de Catalunya i emprat en nombrosos estudis portuaris. És un model basat en les equacions de Boussinesq, que es discretitzen fent servir un esquema numèric en diferències finites. Per resoldre les equacions resultants, s'utilitza un esquema numèric tipus Abbott, implícit, centrat i de doble escombrat en les direccions dels dos eixos x, y. Els valors dels paràmetres de la discretització que s'han emprat en el cas dels tres ports estudiats són $\Delta x = \Delta y = 3 \text{ m}$ i $\Delta t = 0.25 \text{ s}$.

6.3 El port Olímpic

6.3.1 Ultrapassament

Els cabals d'ultrapassament obtinguts en el port Olímpic per als 4 escenaris de nivell del mar i els tres períodes de retorn es mostren en la Figura 14.

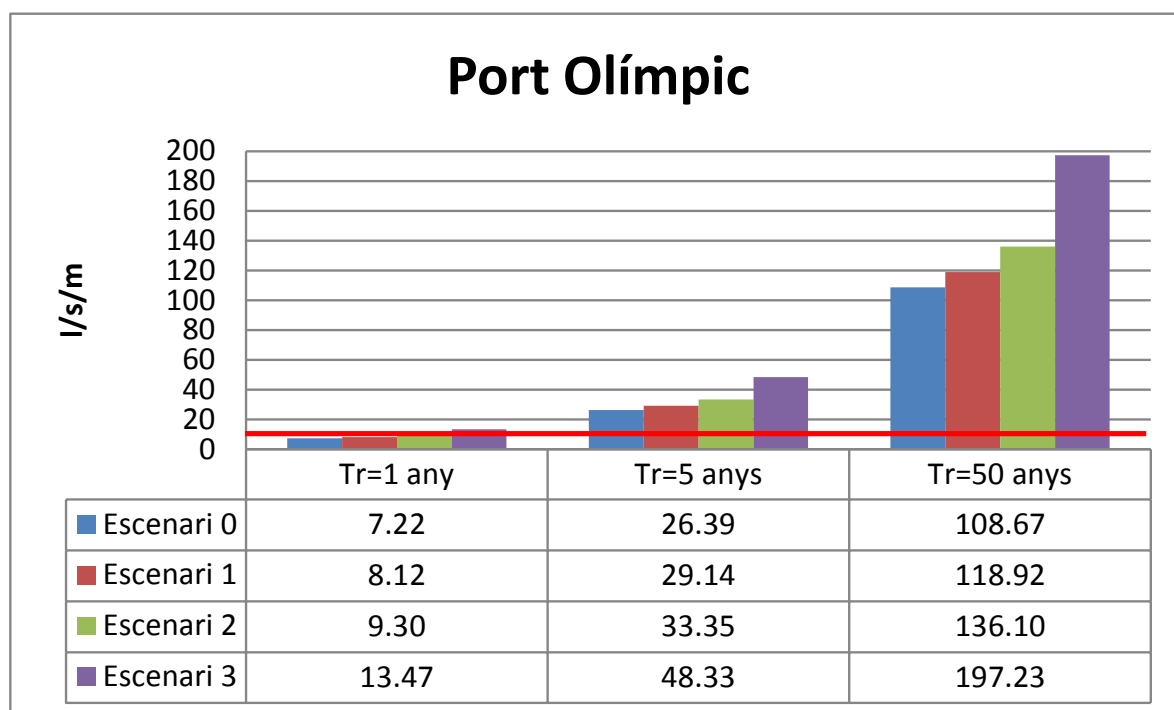


Figura 14. Ultrapassament al Port Olímpic. La línia horitzontal vermella indica el cabal tolerable.

Pot apreciar-se que en la situació actual ja s'excedeix el límit tolerable en el cas de tempestes fortes o excepcionals, tal com s'ha constatat en la realitat. Els diferents escenaris d'increment del nivell del mar aniran empitjorant la situació. Menció especial mereix l'escenari 3 (pujada del nivell del mar de 1.80 m), ja que pràcticament duplica els cabals d'ultrapassament per a tots el períodes de retorn i inclús, en el cas de les tempestes freqüents ($Tr = 1$ any), donaria lloc a fluxos que excedirien l'ultrapassament tolerable.

6.3.2 Agitació

L'aplicació de la metodologia descrita en l'apartat 6.1 al Port Olímpic dona lloc als resultats de la Figura 15., que mostren la diferència entre l'agitació futura i la present, considerant que el nivell del mar es manté constant.

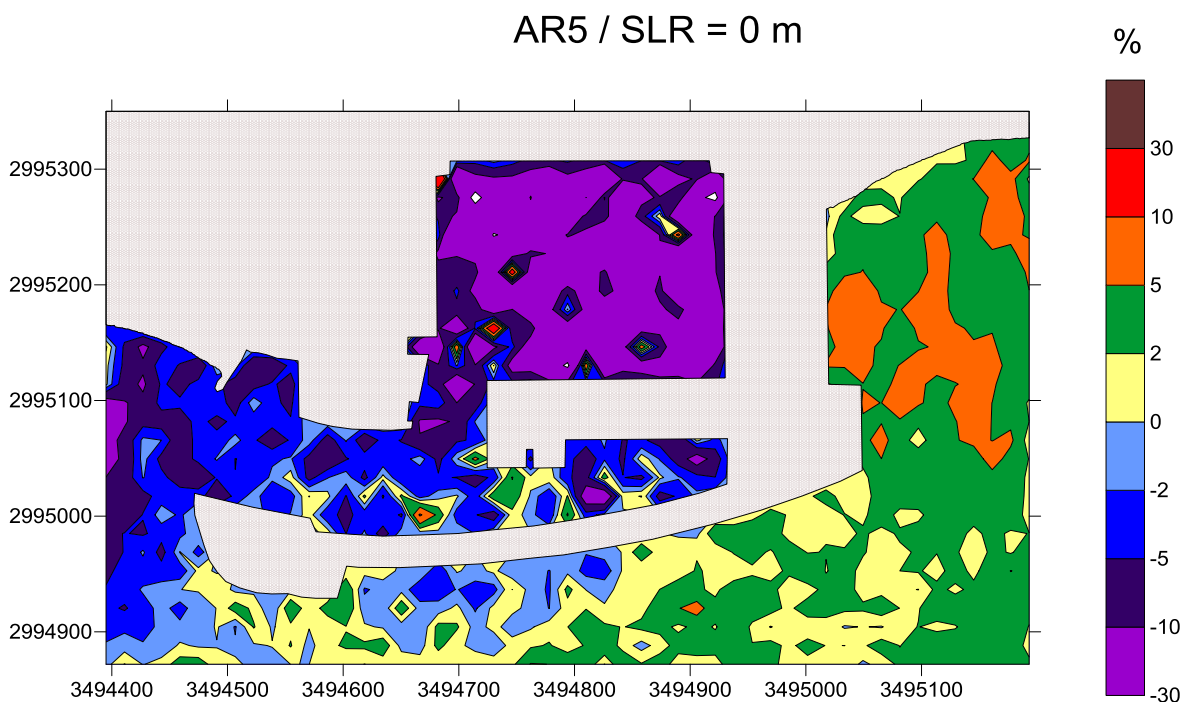


Figura 15. Diferències (en %) entre les condicions futures i les presents al Port Olímpic per a una pujada del nivell del mar de 0 m

Pot comprovar-se que els canvis són relativament homogenis a la dàrsena interior del port, amb reduccions de H_s superiors al 10% en gairebé tota la zona. En la dàrsena exterior la disminució de l'agitació és menor i hi ha alguns punts que mostren lleugers increments de H_s . El promig per a tot el port dona una disminució de l'ordre del 10%.

Si es té en compte la pujada del nivell del mar dels tres escenaris considerats (Figura 16. a Figura 18), pot comprovar-se que a mesura que augmenta el nivell del mar, s'amplifica la penetració de les ones a dins del port i, per tant, l'agitació. Això es degut a que a l'incrementar-se el nivell del mar, augmenta la profunditat i, per tant, la longitud d'ona de l'onatge incident que, com a conseqüència, al difractar-se ho farà amb coeficients de difracció més grans. Per tant, a major nivell del mar, major agitació.

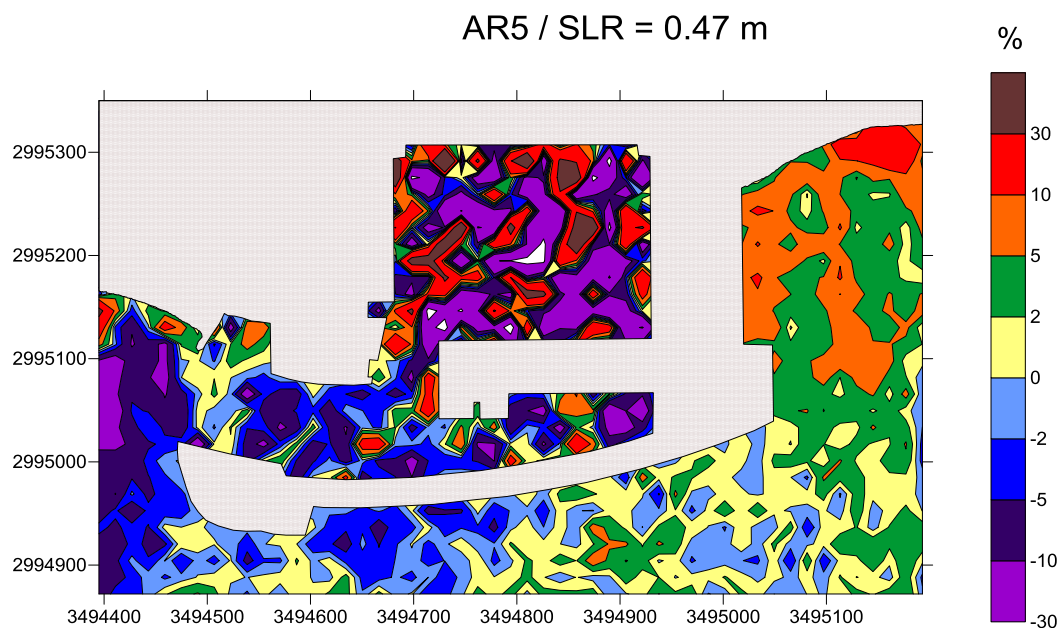


Figura 16.. Diferències (en %) entre les condicions futures i les presents al Port Olímpic per a una pujada del nivell del mar de 0.47 m

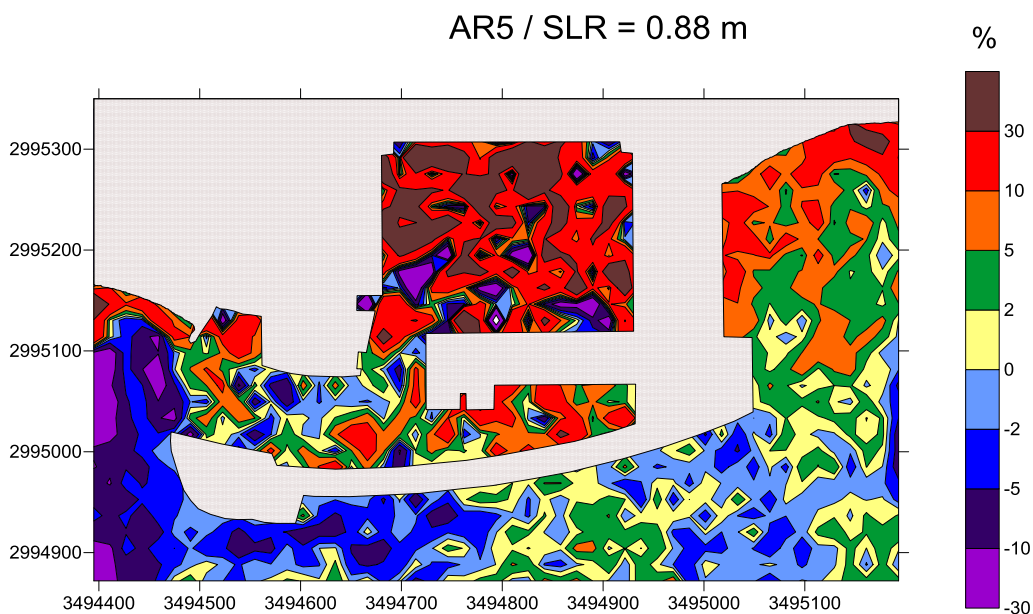


Figura 17. Diferències (en %) entre les condicions futures i les presents al Port Olímpic per a una pujada del nivell del mar de 0.88 m

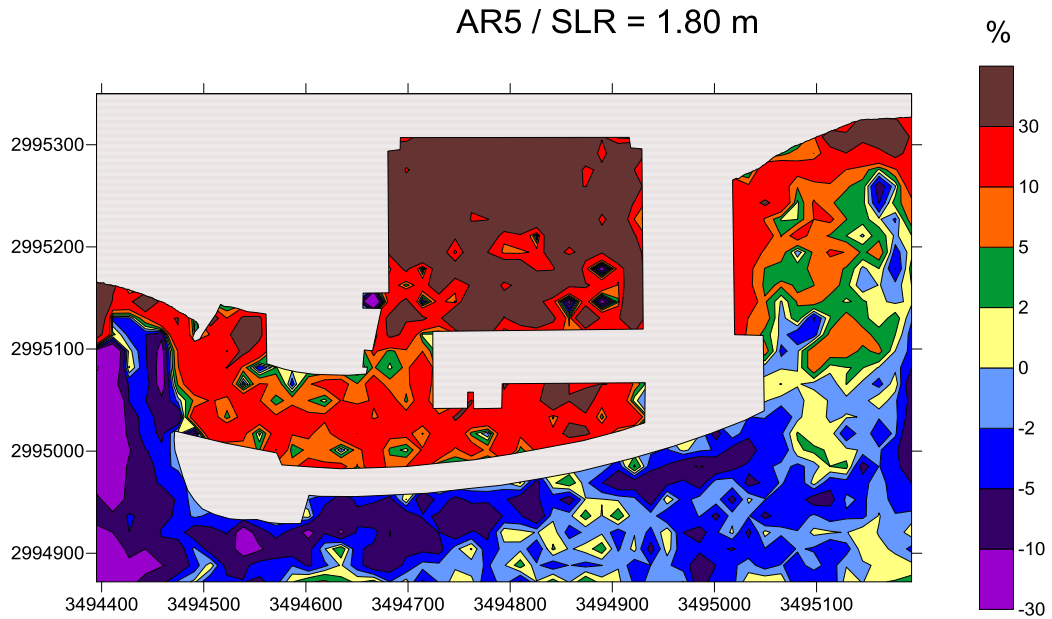


Figura 18. Diferències (en %) entre les condicions futures i les presents al Port Olímpic per a una pujada del nivell del mar de 1.80 m

A la Figura 18 es pot veure com, en el cas d'una pujada extrema del nivell del mar, l'agitació s'incrementaria molt a tot el port, amb augments de la Hs superiors al 10% a pràcticament tot el port i més grans del 30% a gran part de la dàrsena interior.

6.4 El port Fòrum

6.4.1 Ultrapassament

El Port del Besós (Figura 19.), per la seva relativament baixa cota de coronació, té cabals d'ultrapassament bastant més grans. No obstant, degut a que no hi ha activitats darrere del dic de recer, l'ultrapassament admissible és molt més gran (200 l/s/m) i només s'excedeix en el cas de tempestes excepcionals i per als quatre escenaris. Cal esmentar que l'escenari 2 (augment del nivell de 0.88 m) pràcticament duplica l'ultrapassament de la situació present, mentre que l'escenari 3 quadruplica o quintuplica (depenent del període de retorn) els cabals actuals.

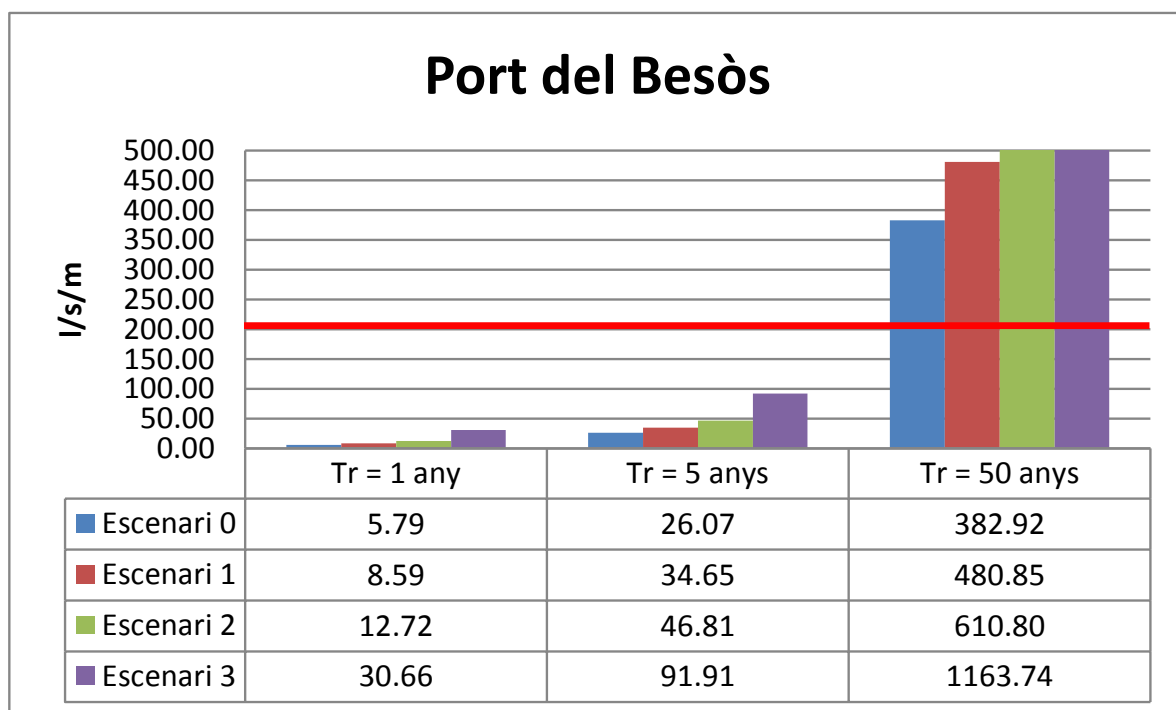


Figura 19. Ultrapassament al Port Fòrum. La línia horitzontal vermella indica el cabal tolerable.

6.4.2 Agitació

En la Figura 20. es mostra la diferència d'agitació entre les condicions futures i les presents per al Port Fòrum, assumint que no hi ha augment del nivell del mar i que els canvis es deuen només a la modificació dels patrons d'onatge. S'observa que H_s disminueix lleugerament a gran part del port, encara que hi ha àrees on l'agitació augmenta. Aquests comportaments oposats s'expliquen per la complexitat dels processos de propagació de l'onatge a dins del port, principalment la reflexió de l'onatge. El promig per a tot el port resulta en una certa disminució de l'agitació, de l'ordre del 4%.

Un augment del nivell del mar de 0.47 m produeix una reducció addicional de la H_s , sobretot a la dàrsena més interior del port (Figura 21). Aquesta disminució s'explica perquè els processos de shoaling i refracció produeixen una H_s menor i, en aquest cas concret, aquesta reducció predomina sobre l'efecte de la difracció, que tendeix a amplificar l'agitació.

En el cas de pujades superiors del nivell del mar (Figura 22. i Figura 23.), l'efecte de la difracció s'imposa als altres processos i, a mesura que el nivell del mar és més alt,

l'agitació a l'interior del port és més gran, destacant el cas d'un increment del nivell de 1.80 m, que dona lloc a un augment important de la Hs a tot el port.

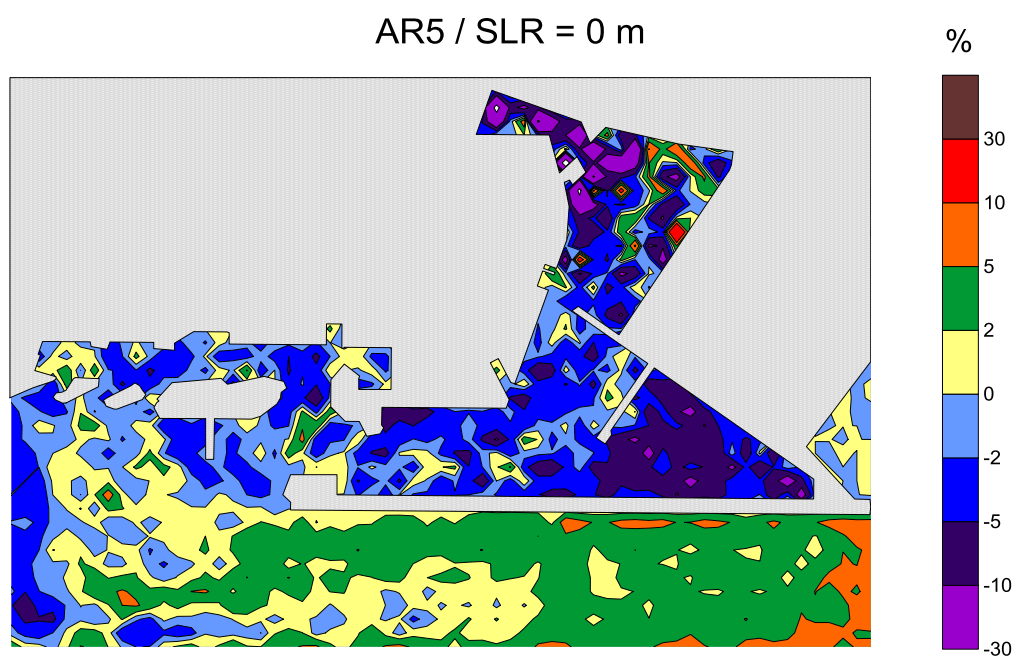


Figura 20. Diferències (en %) entre les condicions futures i les presents al Port Fòrum per a una pujada del nivell del mar de 0 m

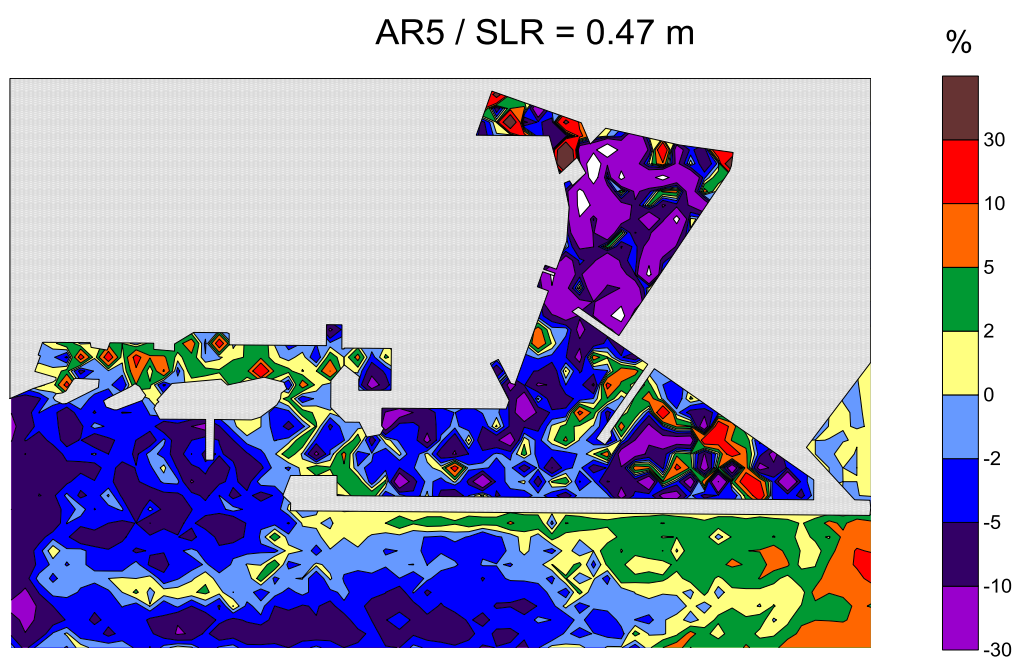


Figura 21. Diferències (en %) entre les condicions futures i les presents al Port Fòrum per a una pujada del nivell del mar de 0.47 m

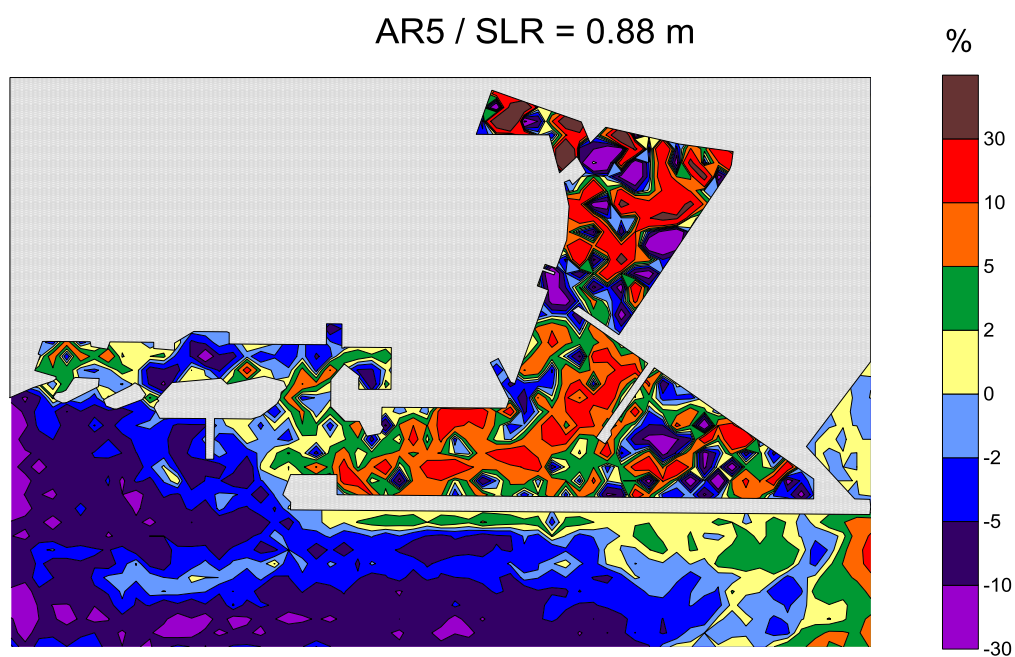


Figura 22. Diferències (en %) entre les condicions futures i les presents al Port Fòrum per a una pujada del nivell del mar de 0.88 m

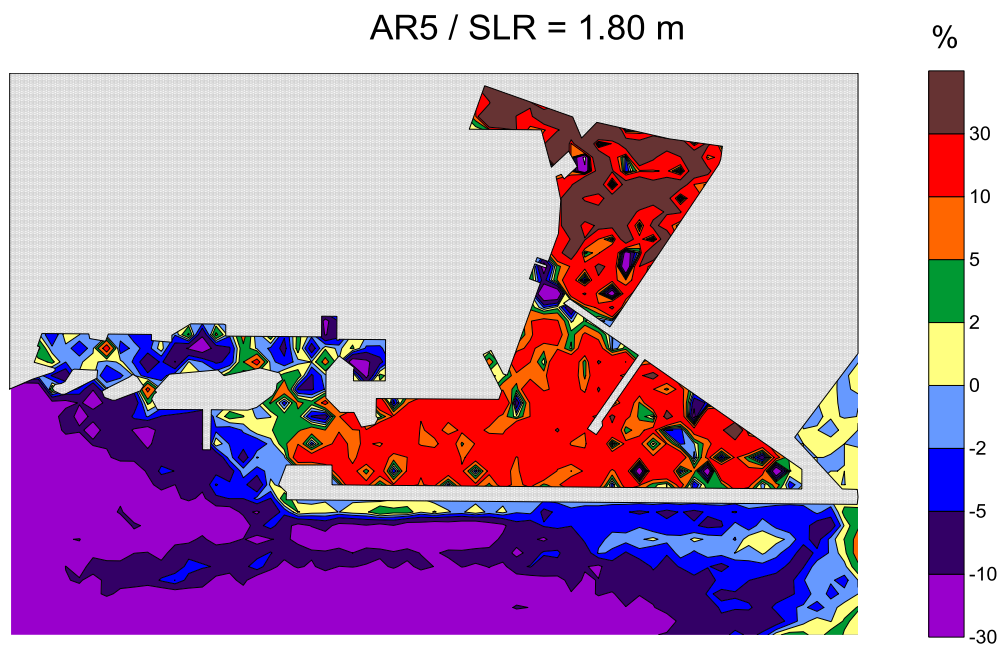


Figura 23. Diferències (en %) entre les condicions futures i les presents al Port Fòrum per a una pujada del nivell del mar de 1.80 m

6.5 El port de Badalona

6.5.1 Ultrapassament

El Port de Badalona (Figura 24.). degut a la seva elevada cota de coronació, és el que està més ben preparat per fer front a l'ultrapassament, tant en les condicions actuals com en les futures. Pot comprovar-se que per a tempestes freqüents o de mitjana intensitat, els fluxos d'aigua per sobre del dic de recer són negligibles. En el cas de tempestes excepcionals, si bé per al escenari 3 s'incrementa significativament l'ultrapassament, aquest es manté per sota del límit tolerable. Per tant, es pot concloure que, des del punt de vista de l'ultrapassament, el Port de Badalona no necessitarà mesures d'adaptació.

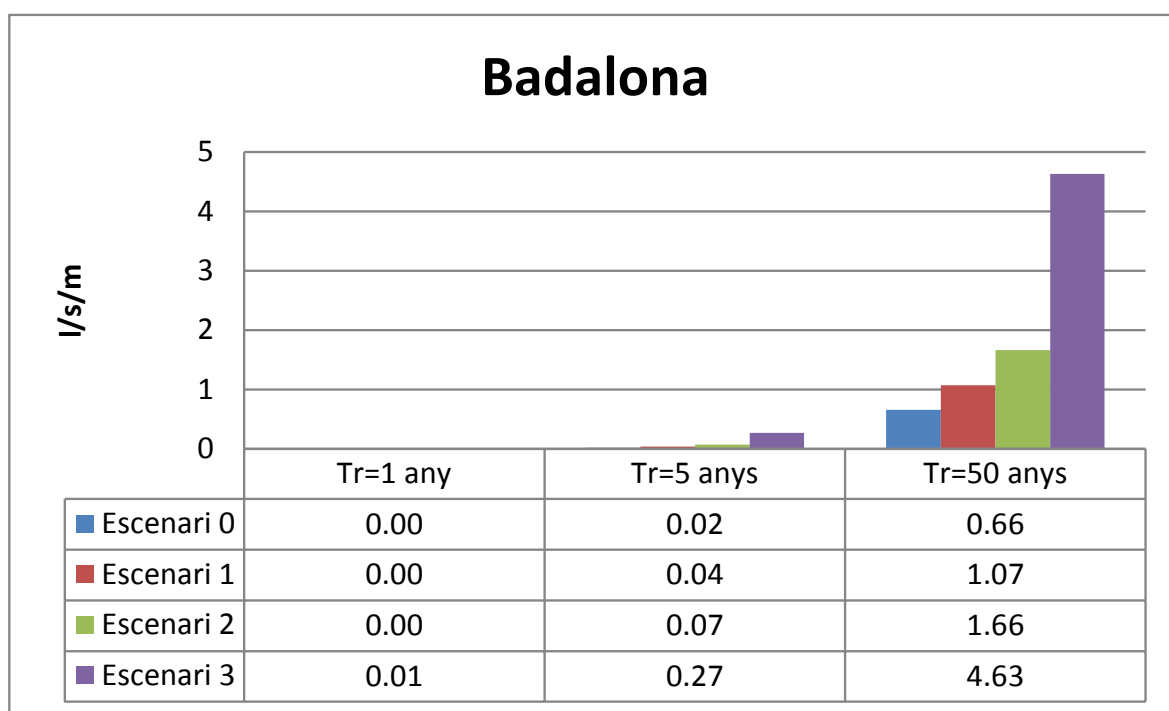


Figura 24. Ultrapassament al Port Olímpic. La línia horitzontal vermella indica el cabal tolerable.

6.5.2 Agitació

En el Port de Badalona, el comportament futur de l'agitació, si no hi ha pujada del nivell del mar, és completament diferent que en els dos casos anteriors, amb increments de Hs a tot el port (Figura 25.). En aquest cas concret, això es degut als canvis en la distribució direccional futura de l'onatge, ja que l'augment de les freqüències de les ones de l'ENE, E i ESE genera més ones reflectides als espigons situats a prop de la bocana del port. Aquest espigons són els que protegeixen el sobreexidor del carrer de la Mar Jònica.

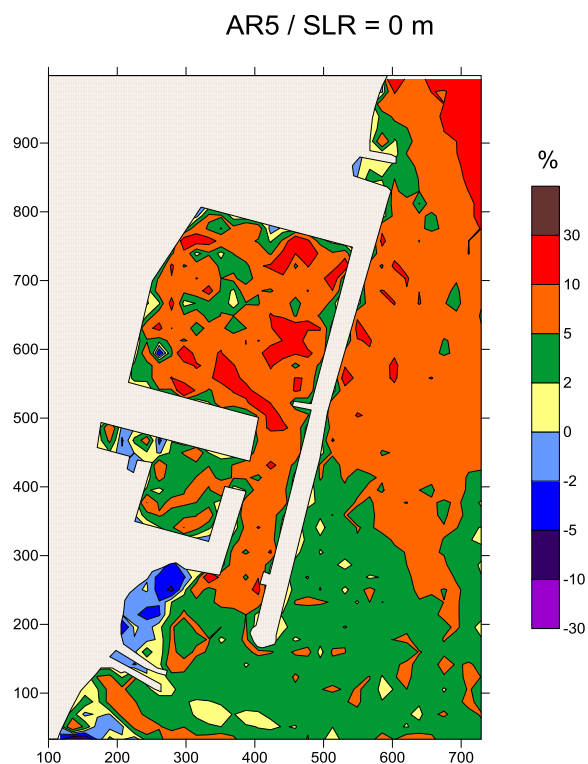


Figura 25. Diferències (en %) entre les condicions futures i les presents al Port de Badalona per a una pujada del nivell del mar de 0 m

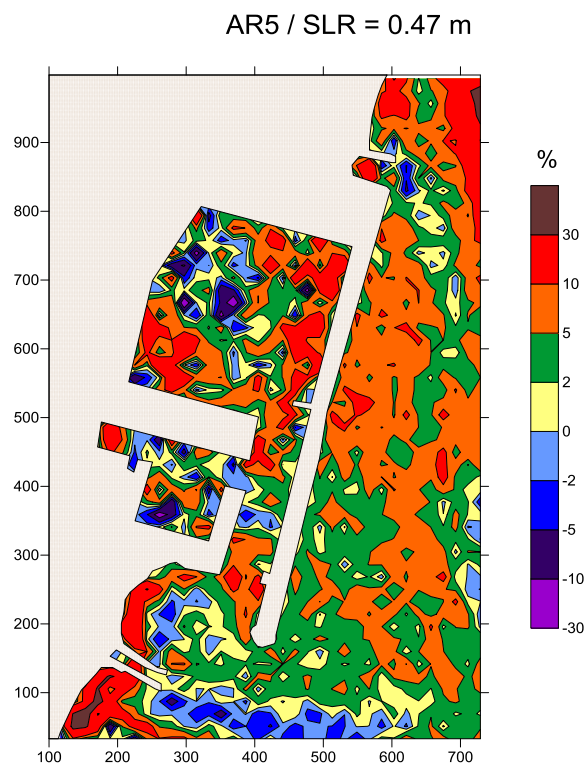


Figura 26. Diferències (en %) entre les condicions futures i les presents al Port de Badalona per a una pujada del nivell del mar de 0.47 m

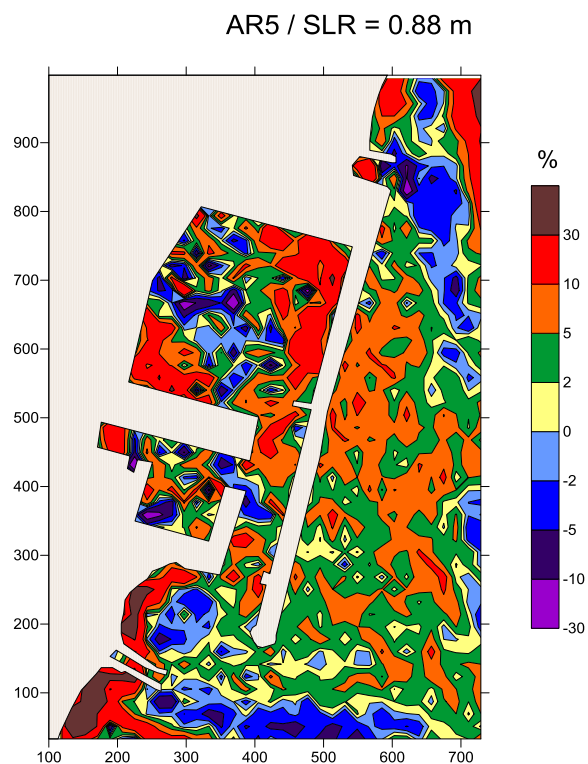


Figura 27. Diferències (en %) entre les condicions futures i les presents al Port de Badalona per a una pujada del nivell del mar de 0.88 m

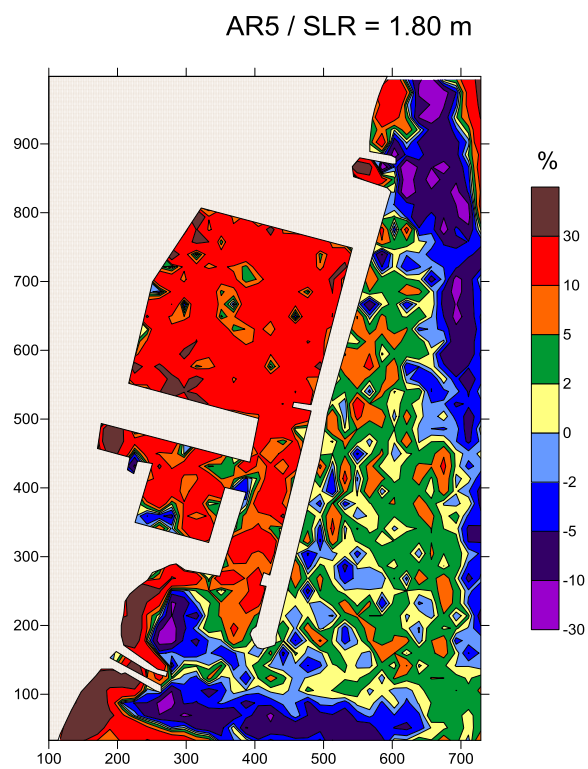


Figura 28. Diferències (en %) entre les condicions futures i les presents al Port de Badalona per a una pujada del nivell del mar de 1.80 m

Si el nivell del mar puja 0.47 o 0.88 m, l'efecte de la refracció i del shoaling fa que els increments siguin menors a l'interior del port i que, alguns punts, inclús registrin reduccions de la Hs. No obstant, una pujada extrema de 1.8 m faria que predominessin els efectes de la difracció i, per tant, s'incrementaria notablement l'agitació a l'interior del port.

En la **Taula 6** es resumeixen els resultats d'agitació, on es pot comprovar el que s'ha esmentat en els paràgrafs anteriors.

Taula 6 Variacions de l'agitació en els tres ports en la situació futura (2081-2100) respecte a l'actual (1986-2005) per a diferents variacions de nivell del mar (SLR).

Port	SLR = 0 m	SLR = 0.47 m	SLR = 0.88 m	SLR = 1.80 m
Olímpic	-10.1%	-2.2%	+15.4%	+27.7%
Fòrum	-3.9%	-5.0%	+6.1%	+27.7%
Badalona	+6.8%	+4.9%	+5.7%	+17.9%

7 RECOMANACIONS PER A MITIGAR ELS IMPACTES A LES PLATGES

7.1 Estratègia general

La zona litoral és un ambient altament dinàmic que respon a les escales de temps i espai dels agents impulsors. Les característiques específiques de cada platja fan que la seva gestió hagi de fer-se de forma particularitzada.

La premissa general seguida en aquest estudi ha estat la d'intentar minimitzar les problemàtiques existents en la situació present i veure la seva funcionalitat en escenaris de canvi climàtic.

El ventall d'alternatives possible és molt ampli i per això s'han prioritzat actuacions que tenen per missió defensar el rera-platja de la inundació i a l'hora poden servir com a font de sediment al sistema sense repercutir negativament en les platges adjacents. Aquestes alternatives es corresponen amb un cordó dunar i una alimentació de sorres.

D'altre banda, en el cas particular de la platja de Sant Sebastià i Barceloneta, donada la seva configuració de platja encaixada s'avalua una alternativa rígida molt soma en forma de dic exempt d'esculleres submergit.

Es contempla de forma desacoblada l'efecte del nivell de mar sense onatge. En aquest cas s'escull una aportació de sorres per tal de minimitzar l'erosió associada.

7.2 Recomanacions per a la platja de Gavà

Tal com s'ha definit en l'apartat d'impactes, la platja de Gavà és una platja dissipativa de baixa cota de coronació on els majors canvis vindran associats a una hipotètica pujada del nivell del mar. Les diferents direccionalitats tenen associats canvis en la inundació/erosió d'ordres de magnitud semblants, amb excepció de la direcció SSW, que mostra un increment de l'àrea inundada a la part Nord del domini. El tram, actualment, es troba en un estat erosiu que es veuria incrementat amb el canvi climàtic. Per tal de

mantenir un ample suficient per a la funció de protecció, es proposa la combinació de dos intervencions:

- (i) Una alimentació artificial d'uns 50.000 m³ que permeti guanyar en ample de platja útil, a més de generar una vora de la costa suavitzada, on els gradients longitudinals siguin minimitzats.
- (ii) Un cordó dunar transitori d'uns 45.000 m³, situat com a línia de defensa just immediata al sistema dunar actual. Aquesta duna transitòria aportaria una defensa efímera envers temporals de mar, a més d'actuar com a volum addicional de sorra per a mantenir l'ample mínim a la platja emergida. Aquest cordó tindria una longitud de 3.4 km i la secció transversal consisteix en una trapezoide amb alçada mitjana de 1.5 metres i ample de coronació de 3 metres.

Per tal d'avaluar l'eficiència d'aquestes estratègies envers l'impacte sense intervenció, s'han determinat dos índexs:

- (i) Per a la inundació, el percentatge d'àrea emergida inundada (en %) tant per a les intervencions, com per a les diferents recomanacions. D'aquesta manera, com més baix sigui el coeficient, més capacitat protectora envers la inundació té la zona emergida.
- (ii) Per a l'erosió/sedimentació, s'ha determinat el volum disponible al final dels temporals sintètics de forma individual per a tots els escenaris (situació de diagnòstic i estratègies d'adaptació/mitigació). Posteriorment, els volums finals obtinguts en les estratègies d'adaptació han estat dividits entre la situació de diagnòstic corresponent. Conseqüentment, com més alt sigui el coeficient, més volum de sorra roman al final de l'episodi, per a una determinada estratègia de gestió. Si aquest número és superior a 1, la solució conserva més volum de sorra que l'escenari de diagnòstic; si és inferior a 1, al contrari, hi ha un volum inferior.

En la **Figura 29** es pot apreciar el índex d'inundabilitat per a totes les simulacions realitzades al domini de Gavà, contemplant tant la situació de diagnòstic (impacte) com per les estratègies d'adaptació/mitigació envers el canvi climàtic. Al contrari del que passa en la platja de Sant Sebastià, on les solucions projectades sempre mostren un millor

comportament, a Gavà la solució duna+alimentació mostra una millor eficiència amb nivells de 0.88 m (RCP 8.5), però tant amb baixos increments del nivell del mar com l'escenari high-end, l'índex d'inundabilitat és molt semblant i, en certs casos, inclús lleugerament superior. Això passa perquè la superfície de platja emergida en la intervenció és superior que en el cas de diagnòstic. Això ve donat per l'alimentació de 50000 m³ que homogeneïtza l'ample mínim emergit a entre 20-30 metres. Conseqüentment, no és tan comparable directament com la platja de Sant Sebastià on sempre la superfície útil de platja roman igual.

No obstant, la notable diferència en el cas de RCP 8.5 evidencia que el cordó dunar transitori contribueix a la protecció de la zona emergida, aportant una línia de defensa addicional al sistema dunar existent. Cal també afegir, que la direccionalitat de l'onatge no té un paper clarament discriminadori, mostrant índexs semblants per a tot el ventall direccional analitzat, excepte per a la direcció SSW, que mostra els valors més alts d'inundabilitat, en tots els escenaris.

Si en la inundabilitat la direccionalitat no mostra grans diferències, sí que s'hi donen en el cas dels volums finals (Figura 30.). La major eficiència mostra un predomini del sector SSW, que és on l'onatge és més extrem. Això indica que el cordó dunar transitori i l'alimentació són capaços de reduir els fluxos de sediment de forma més eficient que no pas la configuració sense intervenció. Les diferències (distància vertical) entre sectors direccionals incrementen conforme els escenaris d'increment del nivell del mar esdevenen més alts. Quan els nivells són relativament baixos (0.47 m, RCP 4.5), s'observa que períodes de retorn més baixos tenen una menor diferència que no pas els més alts (50 anys).

No obstant, en tots els casos, el ratio es manté positiu i per tant, les estratègies de gestió són capaces de reduir (però no aturar) el flux erosiu que el canvi climàtic pot induir a la platja de Gavà.

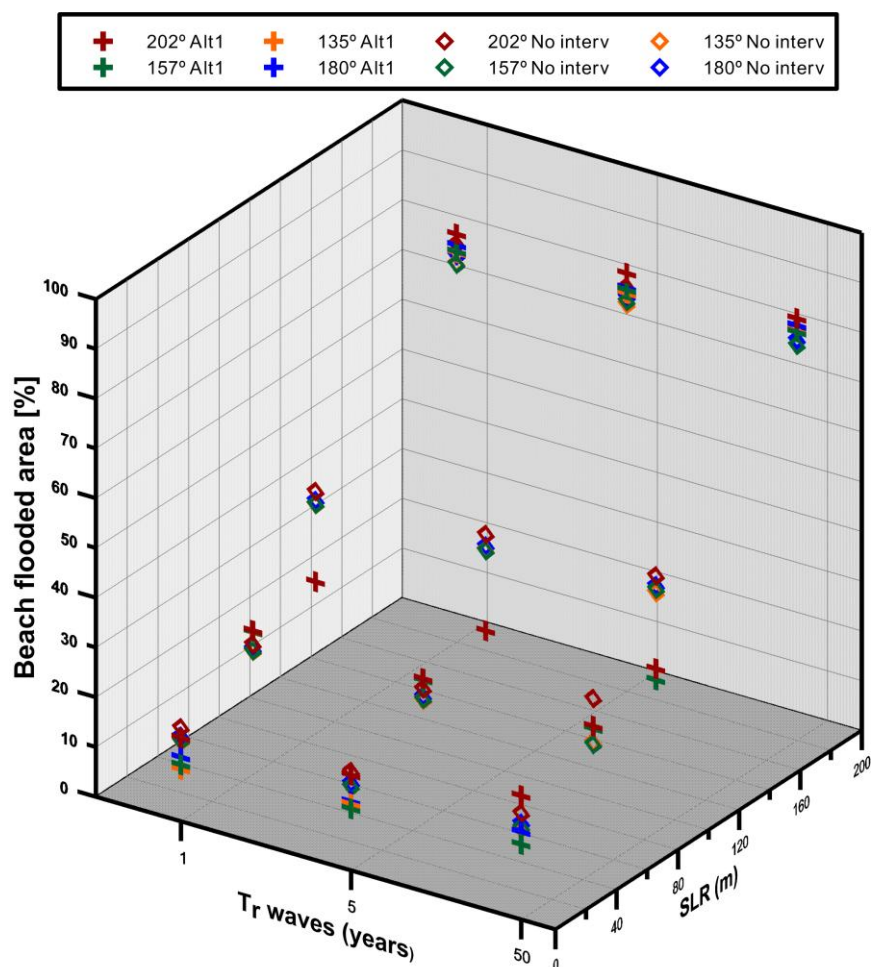


Figura 29. Percentatge de platja inundada (eix vertical) per la situació de diagnòstic i estratègia d'actuació, envers els agents hidrodinàmics: onatge (període de retorn en anys, T_r waves (years)) e increment del nivell mig del mar (SLR en cm). Simbologia: els rombes representen l'opció sense intervenció; les creus l'alternativa amb cordó dunar transitori i alimentació de la part emergida de la platja. El color aplicat a cada símbol està associat amb la direcció de l'onatge.

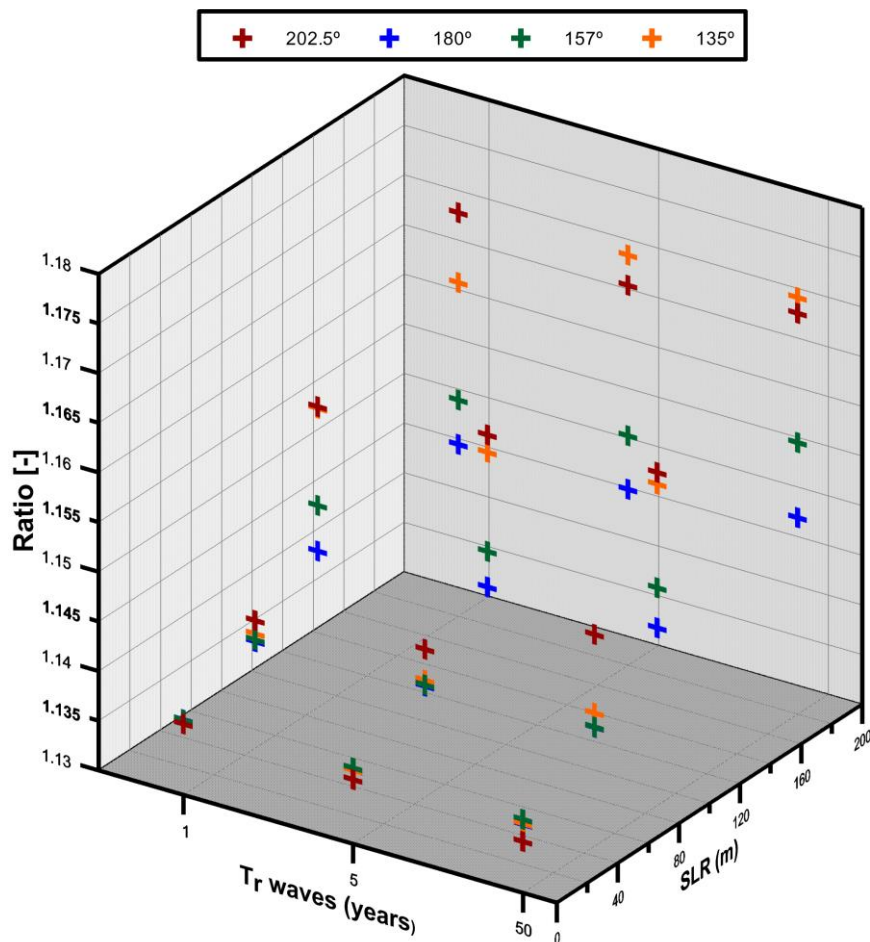


Figura 30. Ratio de conservació de volum final de platja (eix vertical) per la recomanació proposada a Gavà, envers els agents hidrodinàmics: onatge (període de retorn en anys, T_r waves (years)) e increment del nivell mig del mar (SLR en cm). Simbologia: les creus representen el ratio entre el volum conservat amb cordó dunar transitori i l'escenari de diagnòstic. El color aplicat a cada símbol està associat amb la direcció de l'onatge.

Per tal de compensar els retrocessos ocasionats per la pujada del nivell del mar es requerirà d'un volum de sorres de entre 1 i 3 m³/a en el cas d'assumir una variació lineal amb un màxim a la línia de la costa i nul·la a la fondària activa.

7.3 Recomanacions per a la platja de Sant Sebastià i Barceloneta

Es parteix de la situació de diagnòstic per tal de veure la viabilitat de possibles solucions en escenaris de canvi climàtic.

Amb aquest diagnòstic present, s'han desenvolupat dues estratègies de defensa per a la platja de Sant Sebastià, en la seva configuració més desfavorable que és l'època de temporals de mar. Ambdues cerquen la minimització dels efectes abans esmentats, però alhora considerant una situació futura d'optimització de recursos naturals, energètics i econòmics, fent focus en fonts endògenes. Dos alternatives s'han proposat: (i) un sistema dunar transitori i (ii) dos dics exempts transitoris.

El sistema dunar es basa en el següent:

- Un sistema dunar amb les següents dimensions per a la part Nord (140 metres de longitud, perfil trapezoïdal amb alçada mitjana d' 1.5 m i 3 metres d'ample a cota de coronació) i la part Sud (400 metres de longitud, perfil trapezoïdal amb alçada mitjana d' 1.5 m i 3 metres d' ample a cota de coronació). Cal a dir que la cota de la duna oscil·la entre un màxim de 1.8 m en la part més desfavorable (punt mig de la part Sud) i un mínim de 1.2 m en la part on hi ha un major ample de platja. En total, el volum de sorra necessari està dintre dels 7.500 m³.
- Serveix com a estratègia de mitigació de la inundació, enfocant una major cota de coronació en els punts on s'espera una major incidència de l'onatge.
- Aporta material addicional a la part emergida, en un tram erosiu (CIIRC, 2010).
- El sediment del sistema dunar prové de la part submergida (cotes 0 a -2 m), originant una rasa en la part Sud de la platja. El material doncs, no prové de dragats ni de punts d'aportació a considerables distàncies, reduint els costos i les emissions en l'extracció i transport. L'objecte de la rasa, a la seva vegada, és actuar com una trampa de sorres, de manera que un cop el sistema dunar col·lapsi i el material es mobilitzi mar endins, aquest permeti la colmatació de la rasa. D'aquesta forma, el sediment de la duna queda a profunditats més assolibles de recuperar de cara a la reposició periòdica d'aquest sistema de defensa.

Per la seva banda, els dos dics exempts transitoris es basen:

- En dos dics exempts amb unes dimensions individuals de 140 metres de longitud amb una secció semi-elipsoidal de semieix major de 7 metres i semieix inferior de 1.7 metres. Val a mencionar, que aquestes solucions estarien dintre del límit d'aquestes actuacions, en determinats casos pilots a nivell internacional. Aquest dic exempt pot estar constituït per un geotèxtil omplert amb sorra, aigua o altre tipus de fluid.

- Cerquen l'atenuació de l'acció de l'onatge en la seva zona d'ombra. Hi ha doncs, una menor mobilització. A més, actuen com barreres de retenció del sediment a profunditats entre el dic exempt i la zona emergida. En conseqüència, la recuperació del sediment de la part emergida després d'un temporal de mar, és més assolible.
- Malgrat un increment del nivell del mar, certs trens d'ona extremals començarien a trencar mar endins (a cota de coronació de l'estructura) que no pas en la situació de diagnòstic.
- Aquest sistema també pot emmagatzemar sorra dintre dels dics exempts, de manera que un cop l'època de temporals ha finalitzat, aquest sistema es redistribuït a la part emergida, de cara a la temporada de bany.

Per tal d'avaluar l'eficiència d'aquestes estratègies envers l'impacte sense intervenció, s'han determinat dos índexs:

- (iii) Per a la inundació, el percentatge d'àrea emergida inundada (en %) tant per a les intervencions, com per a les diferents recomanacions. D'aquesta manera, com més baix sigui el coeficient, més capacitat protectora envers la inundació té la zona emergida.
- (iv) Per a l'erosió/sedimentació, s'ha determinat el volum disponible al final dels temporals sintètics de forma individual per a tots els escenaris (situació de diagnòstic i estratègies d'adaptació/mitigació). Posteriorment, els volums finals obtinguts en les estratègies d'adaptació han estat dividits entre la situació de diagnòstic corresponent. Conseqüentment, com més alt sigui el coeficient, més volum de sorra roman al final de l'episodi, per a una determinada estratègia de gestió. Si aquest número és superior a 1, la solució conserva més volum de sorra que l'escenari de diagnòstic; si és inferior a 1, al contrari, hi ha un volum inferior.

En el gràfic de la Figura 31. es resumeixen totes les simulacions realitzades en aquest estudi per a la platja de Sant Sebastià. En aquesta, es pot veure clarament, que en la situació de diagnòstic (triangles), els volums inundats són molt més alts que no pas en les estratègies de gestió. Per tant, en el cas de la inundació, la solució amb duna transitòria és la que presenta uns valors més baixos d'inundabilitat, mentre que els dics exempts presenten una millora, però en menor grau. Aquesta tendència es confirma amb els

diferents rangs de direccionalitat. L'eficiència envers la inundació (distància vertical entre escenaris comparables), guanya importància a partir de nivells del mar iguals o superiors a 0.47 m i períodes de retorn de 5 anys. En condicions hidrodinàmiques inferiors, l'aplicació de les estratègies continua sent vàlida, però la diferència amb la situació de diagnòstic té una menor magnitud.

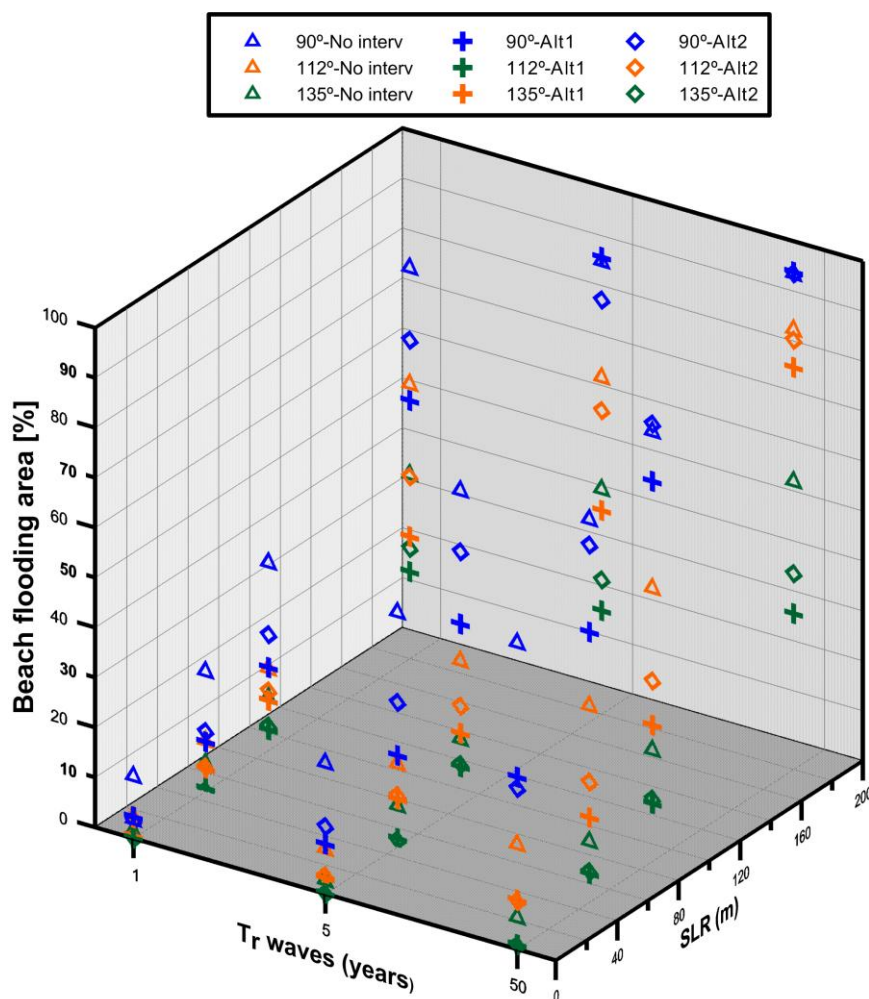


Figura 31. Percentatge de platja inundada (eix vertical) per les diferents recomanacions, envers els agents hidrodinàmics: onatge (període de retorn en anys, T_r waves (years)) e increment del nivell mig del mar (SLR en cm). Simbologia: els triangles representen l'opció sense intervenció; les creus l'alternativa amb sistema dunar i els rombes la solució amb dics exempts transitoris. El color aplicat a cada símbol està associat amb la direcció de l'onatge.

En referència a l'erosió/sedimentació, el sistema dunar presenta majors volums finals en la zona emergida, en detriment dels dics exempts (Figura 32.). Cal mencionar, però, que a l'entrar un volum addicional de sorra a la part emergida, malgrat ésser de la part submergida, és raonable que el volum final sigui sensiblement superior al cas sense

intervenció. En el cas de la duna, de forma similar al que ja passava amb la inundació, existeixen majors distàncies verticals (eficiències) entre els diferents sectors direccionals quan es supera un llindar de 5 anys de període de retorn i un nivell mig de 0.47 cm (RCP 4.5). Aquestes diferències entre sectors direccionals, no tenen tanta incidència amb els dics exempts, aportant ratios d'eficiència semblants de forma independent a la direcció.

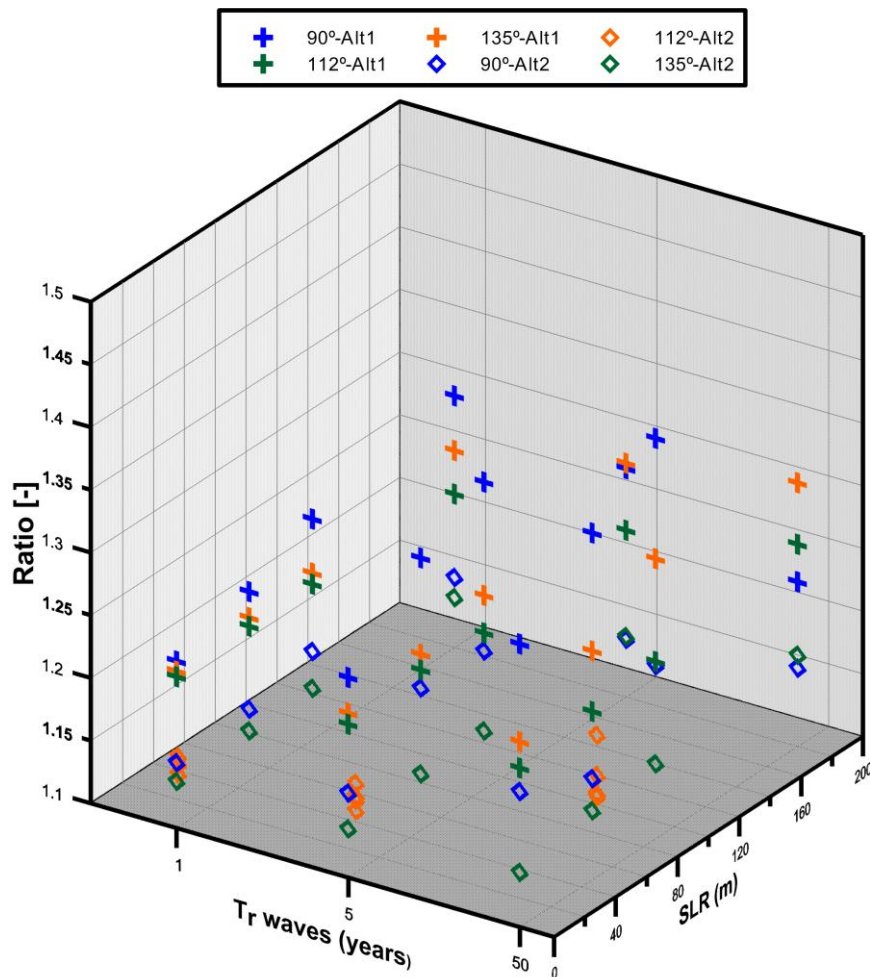


Figura 32. Ratio de conservació de volum final de platja (eix vertical) per les diferents recomanacions, envers els agents hidrodinàmics: onatge (període de retorn en anys, T_r waves (years)) e increment del nivell mig del mar (SLR en cm). Simbologia: les creus representen el ratio entre el volum conservat amb sistema duna i l'escenari de diagnòstic; els rombes el mateix ratio entre la solució amb dics exempts transitoris i l'escenari de diagnòstic. El color aplicat a cada símbol està associat amb la direcció de l'onatge.

Per tal de compensar els retrocessos ocasionat per la pujada del nivell del mar es requerirà d'un volum de sorres de entre 0.5 i 2 m³/a en el cas d'assumir una variació lineal amb un màxim a la línia de la costa i nul·la a la fondària activa.

8 RECOMANACIONS PER A ELS PORTS

8.1 Estratègia general

Les mesures d'adaptació de les infraestructures portuàries al canvi climàtic es poden classificar en tres grans grups:

- Intervencions dures (grises) en les infraestructures.
- Plantejaments verds en les infraestructures.
- Accions suaus (no infraestructurals).

El primer grup correspon a mesures relacionades amb la modificació o la construcció d'estructures que redueixin o eliminin els potencials impactes, com per exemple canvis en planta del port, increment de la cota de coronació de dics o molls, reforçament de dics o construcció de bermes.

El segon grup fa referència a la utilització d'elements naturals, com per exemple plantes aquàtiques, per a esmorteir l'acció de l'onatge.

Finalment les accions suaus tenen a veure amb l'educació i la conscienciació dels sectors implicats en l'activitat portuària, l'extensió de l'ús de les energies renovables, la planificació de mesures d'adaptació o la monitorització a llarg termini dels paràmetres més rellevants com onatge, nivell del mar etc.

8.2 Mesures d'adaptació a l'agitació

Per minimitzar els possibles efectes del canvi climàtic sobre l'agitació, la millor mesura d'adaptació consisteix en canviar la planta del port, de manera que aquest pugui afrontar els canvis en la direcció de l'onatge o les modificacions generades per processos com la difracció i la reflexió.

Per exemple, en el cas del port Fòrum, es podria plantejar una prolongació del dic de recer, tal com es mostra en la Figura 33.. S'ha fet un estudi preliminar de com es comportaria aquesta mesura en front de diferents onatges. Per això s'han provat tres onatges de direccions diferents (corresponents a tempestes registrades en la zona) i s'han comparat les agitacions mitges a tres zones, que es mostren a la Figura 34..

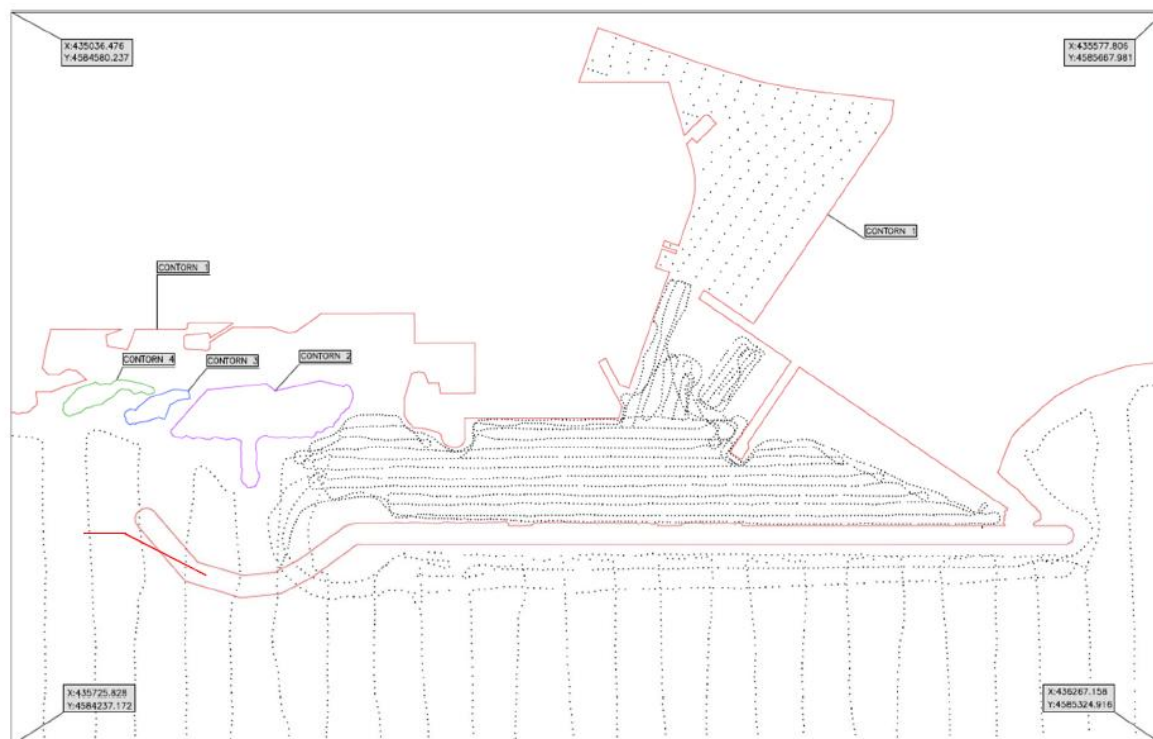


Figura 33. Mesura d'adaptació a l'agitació per al Port Fòrum: prolongació del dic de recer.

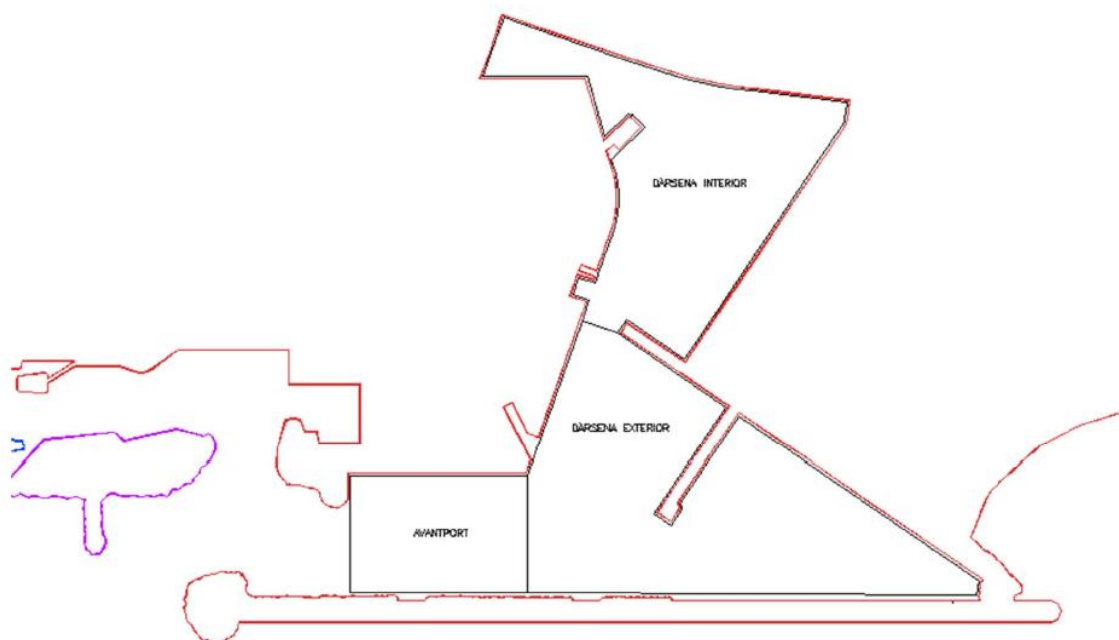


Figura 34. Zones del port on es compara l'agitació.

Els resultats es mostren en la **Taula 7**, on es pot veure com, en totes les zones i per a tots els onatges, l'agitació disminueix significativament. Això permet pronosticar que aquesta mesura del tipus dur, reduiria l'agitació a l'interior del port en qualsevol cas i, per tant, permetria al port adaptar-se a les futures condicions.

Taula 7. Variacions de l'agitació mitja en el port Fòrum amb el canvi de planta respecte a la situació actual a tres zones: avantport (AV), dàrsena exterior (DE) i dàrsena interior (DI)

Hs (m)	Tp (s)	Direcció	Variació		
			AV	DE	DI
4.39	13	E	-26.7%	-21.2%	-22.1%
3.75	9	SSW	-23.8%	-30.2%	-39.2%
2.40	8	S	-40.9%	-44.7%	-36.2%

8.3 Mesures d'adaptació a l'ultrapassament

Si bé hi ha mesures verdes que estan en fase de futura experimentació, com la utilització de plantes en els dics de recer per disminuir la remunta i, per tant, l'ultrapassament, en el moment actual les mesures d'adaptació més efectives en aquest sentit entren dins de les mesures dures. Entre les més efectives, a priori, hi hauria l'augment de la cota de coronació del dic o la construcció d'elements dissipadors d'energia com bermes i dics submergits.

De manera preliminar, s'ha avaluat com variarien els cabals d'ultrapassament si s'augmentés la cota de coronació al dic de recer del Port Fòrum. Els resultats es presenten a les figures compreses entre la Figura 35. i la Figura 38. En la Figura 35. es mostren les reduccions (en %) per als quatre escenaris estudiats i per a increments de la cota de coronació de 0.5, 1.0 i 1.5 m. Es pot comprovar com a mesura que augmenta la cota de coronació, la reducció del cabal d'ultrapassament és més gran. En les restants figures s'indiquen els cabals que es registrarien amb els augments de la cota de coronació del dic de recer del Port Fòrum. Pot apreciar-se que, en la majoria dels casos,

per a tempestes excepcionals, es sobrepassa el cabal d'ultrapassament admissible, mentre que per a les tempestes més suaus, el cabal és molt inferior. Per tant, les mesures analitzades són insuficients per reduir el cabal per sobre del llindar admissible en el cas de tempestes amb grans períodes de retorn i si ha una pujada del nivell del mar (sigui quin sigui l'escenari).

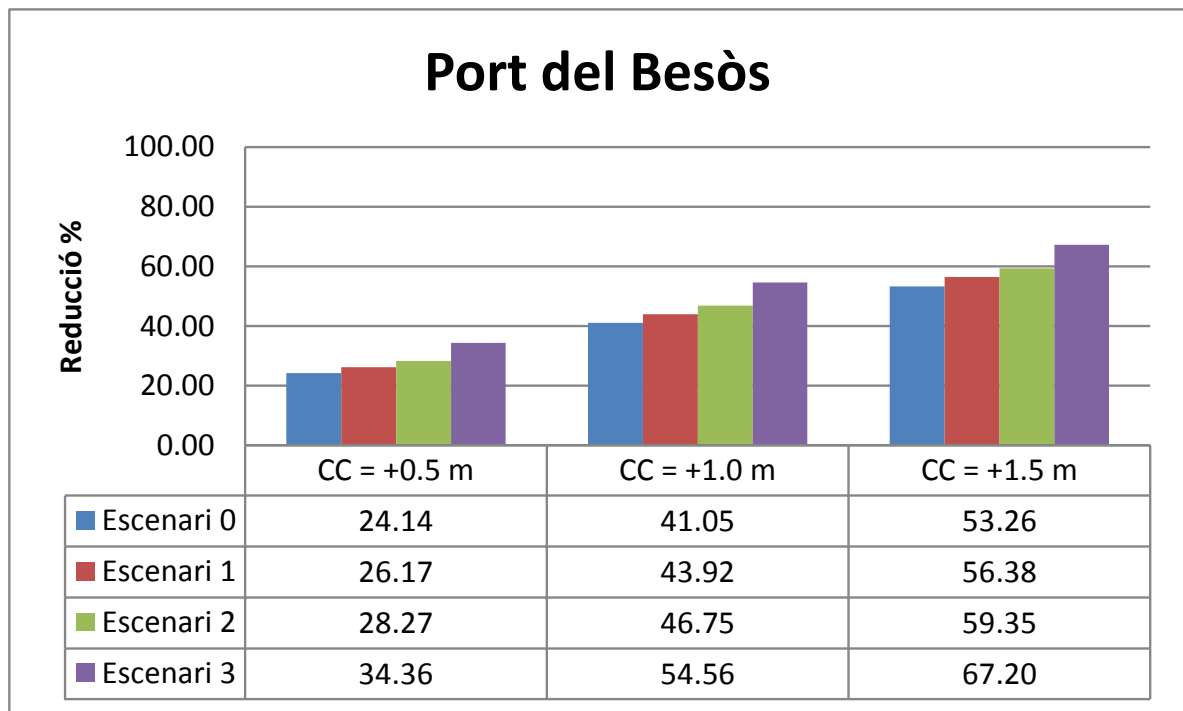


Figura 35. Reduccions (en %) de l'ultrapassament al Port Fòrum per a diversos increments de la cota de coronació i els quatre escenaris considerats.

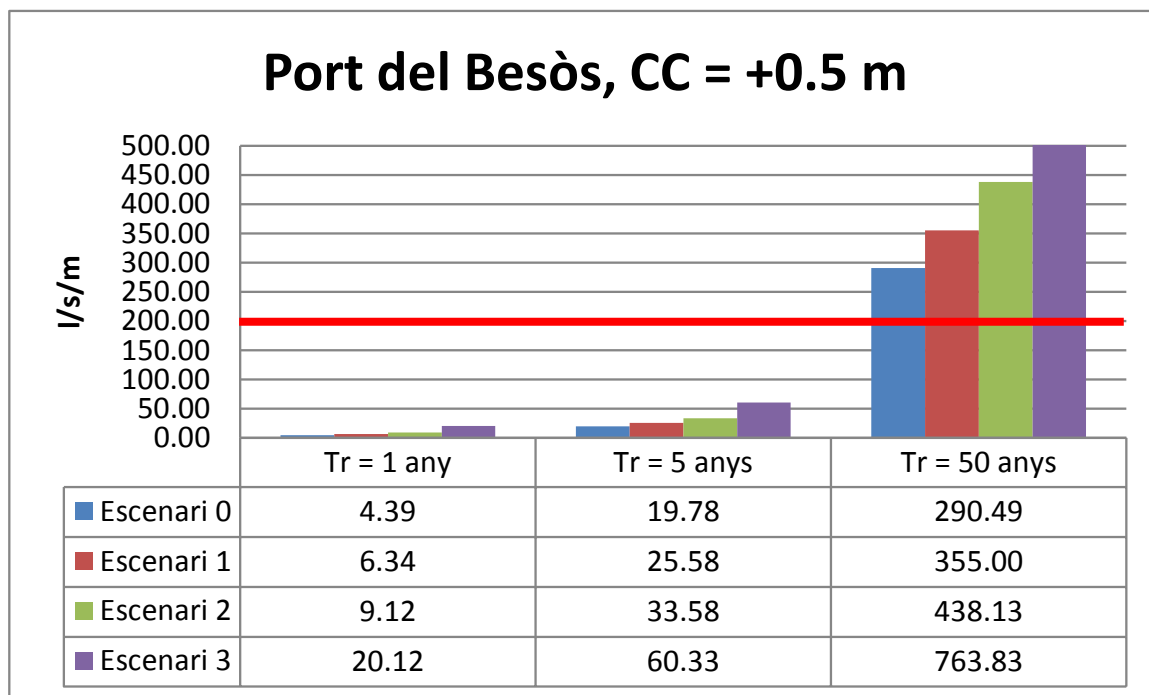


Figura 36.. Cabals d'ultrapassament al Port Fòrum per als 4 escenaris i els 3 períodes de retorn considerats i un increment de la cota de coronació de +0.5m.

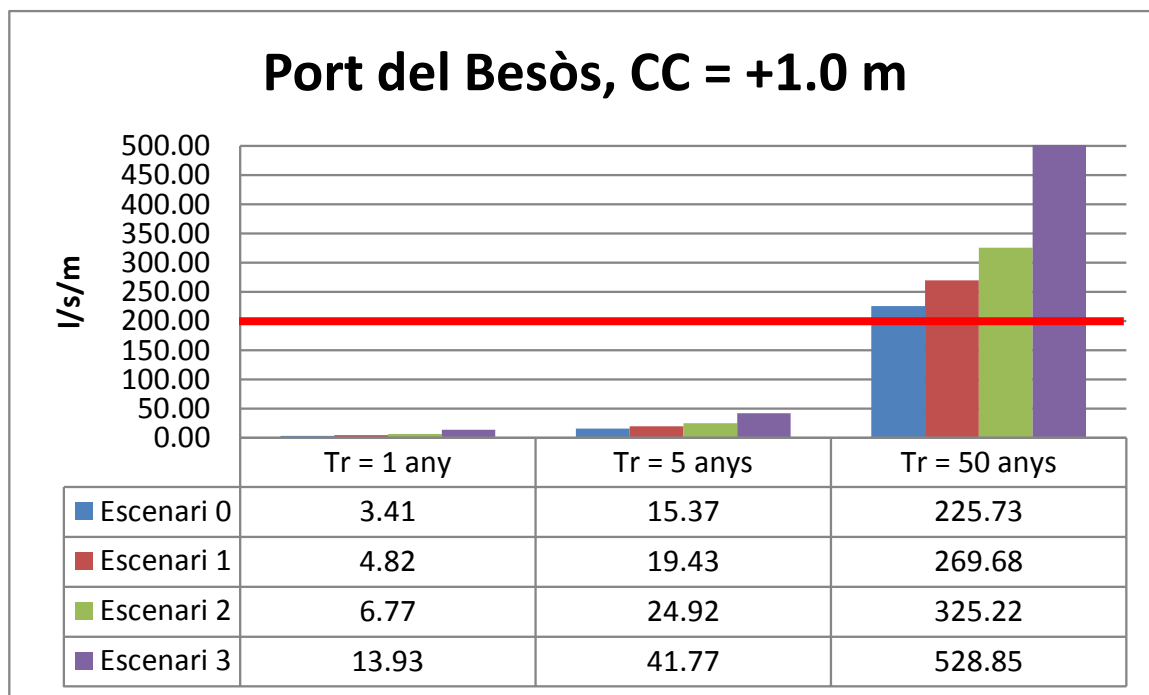


Figura 37. Cabals d'ultrapassament al Port Fòrum per als 4 escenaris i els 3 períodes de retorn considerats i un increment de la cota de coronació de +1.0 m.

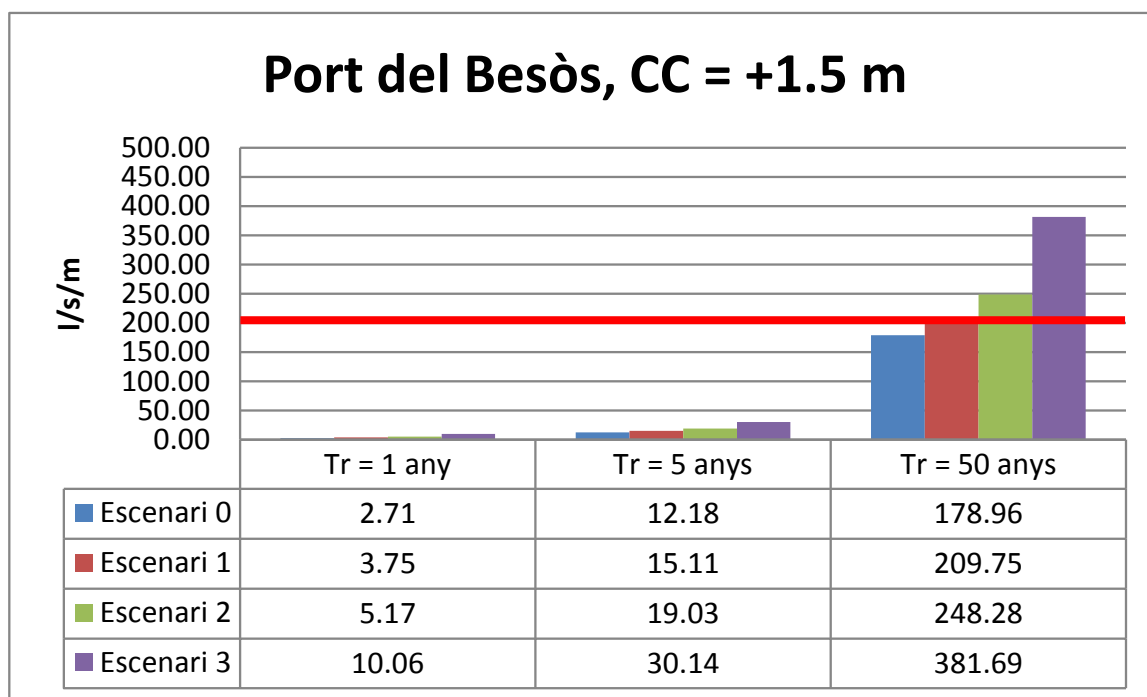


Figura 38. Cabals d'ultrapassament al Port Fòrum per als 4 escenaris i els 3 períodes de retorn considerats i un increment de la cota de coronació de +1.5 m.

9 RESUM

L'efecte del canvi climàtic en les platges de Gavà i Sant Sebastià- Barceloneta intensificarà les dinàmiques existents en les platges.

Els majors canvis s'identifiquen en la platja de Gavà, de més baixa cota i de caire dissipativa. Hi ha una certa homogeneïtat en funció del sector direccional emprat, malgrat que els majors impactes són observats sota la condició SE. El cordó dunar existent pot resistir temporals de fins 50 anys de període de retorn e increments del nivell fins 0.47 m (RCP 4.5.) de forma total i fins 0.88 m (RCP 8.5) de forma parcial.

En canvi, en Sant Sebastià, la incertesa és encara més gran, ja que en funció de la direccionalitat de l'onatge, els resultats varien notablement. Això ve condicionat per la pròpia configuració de la platja, les estructures de defensa existents i el fetch que limita les alçades d'ona màximes per a certs sectors direccionals. A clima futur, tal com passa en l'actualitat, l'efecte dels Llevants serà el que induirà les majors afectacions, però clarament reforçats per l'increment del nivell del mar, la incertesa del qual, proporciona el ventall de situacions de diagnòstic abans esmentades.

Per tal de compensar la pujada del nivell del mar es requereixen entre 1 - 3 m³/m l./any de sorres per tal de mantenir l'actual configuració de la platges.

Un cop avaluats els impactes, s'han proposat una sèrie d'estratègies d'adaptació/mitigació a les platges de Gavà i Sant Sebastià. Les recomanacions obtingudes es resumeixen a continuació.

En la platja de Sant Sebastià, s'han plantejat dues estratègies:

- a) Un sistema dunar transitori de 7.500 m³ en dos trams (reforçant les dues zones amb una menor capacitat de protecció), amb alçada de duna variable entre 1.8 i 1.2 metres.
- b) Dos dics exempts transitoris (amb una vida útil establerta entre un temporal i l'estació més energètica (mitjans de tardor, fins mitjans de primavera)) de 140 metres de longitud, un semieix major de 7m i un semieix menor de 1.7 m, amb la finalitat d'atenuar l'energia incident de l'onatge.

L'eficiència del sistema dunar ha estat superior tant en els índexs d'inundabilitat com de conservació de volum en la zona emergida. L'eficiència envers la inundació i l'erosió (distància vertical entre escenaris comparables), guanya importància a partir de nivells del mar iguals o superiors a 0.47 m (RCP 4.5) i períodes de retorn de 5 anys. En condicions hidrodinàmiques inferiors, l'aplicació de les estratègies continua sent vàlida, però la diferència amb la situació de diagnòstic té una menor magnitud. Els dics exempts presenten també millores respecte a la situació de diagnòstic, però en menor grau.

Per al cas de Gavà s'ha presentat l'acció conjunta de (i) un cordó dunar transitori de 45.000 m³, amb una alçada mitjana d'1.5 metres i (ii) una alimentació artificial de 50.000 m³, de manera que suavitzi la línia de la costa, minimitzant el gradient longitudinal existent, a més de garantir un ample mínim d'entre 20-30 metres.

Donat que l'alimentació de la platja implica un increment de la zona emergida, la inundabilitat no mostra grans millores amb la solució proposada, dificultant la comparació amb la situació de diagnòstic. L'estratègia de defensa implica una millora en la conservació de volum en la zona emergida, on la seva eficiència és major per al sector direccional més desfavorable (SSW) i per alts nivells de mar (RCP 8.5 i high end scenario).

Per tant, es pot concloure que les solucions proposades per a les platges són adients com a primera mesura envers l'adaptació/mitigació del canvi climàtic.

El canvi climàtic afectarà als ports de l'Àrea Metropolitana de Barcelona sobre tot en dos aspectes: modificació dels cabals d'ultrapassament i canvis en els patrons de propagació de l'onatge i, per tant, en la agitació portuària.

Pel que fa a l'ultrapassament, la pujada del nivell del mar incrementarà aquest fenomen, que es veurà potenciat a mesura que aquesta pujada sigui més gran. Els ports més afectats serien el Port Olímpic i el Port Fòrum, encara que aquest darrer solament en cas de tempestes extremes. Pel contrari, en el cas del Port de Badalona, encara que l'ultrapassament augmentaria amb el nivell del mar, en cap cas assoliria nivells preocupants. Per tant, es pot concloure que el port de Badalona està preparat per afrontar els efectes del canvi climàtic sobre l'ultrapassament.

Respecte a l'agitació portuària s'ha estudiat l'efecte dels canvis en els patrons d'onatge i també el de la pujada del nivell del mar. Cal esmentar que l'agitació és un fenomen molt complex, ja que és la combinació d'una sèrie de processos (shoaling, refracció, difracció i reflexió) que a vegades tenen efectes oposats. En el cas dels ports estudiats, la disminució dels onatges de components Sud combinada amb l'augment dels onatges de component Est fa que, si no hi ha pujada del nivell del mar, l'agitació disminueixi als ports Olímpic i Fòrum. Pel contrari, degut a la reflexió de l'onatge en un espigó localitzat a prop de la bocana, l'agitació al port de Badalona s'incrementaria.

D'altra banda, la pujada del nivell del mar farà que, en general, l'agitació es vagi incrementant amb el nivell, de manera que per a una pujada extrema (+1.80m) tindrien lloc grans increments de l'onatge a l'interior dels tres ports (entre 18% i 28%), amb la qual cosa la seva operativitat es veuria seriosament compromesa.

Com estratègia d'adaptació a l'augment de l'ultrapassament associat a la pujada del nivell del mar s'ha proposat recreixer la cota de coronació dels dics de recer. En el cas del Port Fòrum, un increment de la cota de coronació de +1.5m donaria lloc a reduccions dels cabals d'ultrapassament superior al 50%, encara que per tempestes extremes (períodes de retorn de 50 anys) això no seria suficient i s'hauria de pensar en altres mesures com construir una berma davant del dic o pujar encara més la cota de coronació del dic.

Alternativament es pot plantejar l'ús de barreres flexibles submergides o vegetació al talús i coronació per tal de reduir l'ultrapassament sense necessitat d'incrementar l'impacte visual i estètic.

Finalment, la millor estratègia dels ports per adaptar-se als potencials increments de l'agitació al seu interior ocasionats pel canvi climàtic (i en particular per la pujada del nivell del mar) consisteix en redefinir la seva planta, de manera que el port pugui afrontar millor els possibles canvis de direcció de l'onatge o l'increment de l'onatge difractat. S'ha analitzat una proposta de modificació de la planta del Port Fòrum, comprovant-se que, per a totes les direccions de l'onatge, l'agitació disminuiria significativament. Per tant, es pot concloure que l'adaptació dels ports al canvi climàtic requerirà la realització d'obres d'una certa envergadura per modificar la planta i la secció transversal i reduir així els efectes que empitjorin la seva funcionalitat.

Referències

Bolaños,R., Jorda, G., Cateura, J, . López, Puigdefabregas, J., Gomez, J. I M. Espino. (2009). The XIOM: 20 years of a regional coastal observatory in the Spanish Catalan coast. *Journal of Marine Systems*, 77 (3), 237-260.

Casas-Prat M, Sierra J.P. (2012). Trend analysis of wave direction and associated impacts on the Catalan Coast. *Climatic Change* 115:667-691.

Centre Internacional d'Investigació dels Recursos Costaners, CIIRC, (2010). *Estat de la zona costanera a Catalunya, Vol II*. Barcelona. Generalitat de Catalunya.

Centre Internacional d'Investigació dels Recursos Costaners, CIIRC(2012) *Estudi de la dinàmica i problemàtica de les platges de Gavà i Viladecans*. Informe tècnic.

Centre Internacional d'Investigació dels Recursos Costaners, CIIRC (2014) *Proposta per al predisseny de solucions tipus per a estabilitzar les platges del municipi de Gavà*. Informe tècnic.

García-León, M. Gracia, V. Mössö, C., Sierra, J.P., Jiménez J.A.i Sánchez-Arcilla A. (2013) comportament de la platja del trabucador (delta de l'ebre) en un escenari de canvi climàtic. Els efectes dels temporals. %a Jornada Anual del Grup d'Experts del Canvi Climàtic de Catalunya.

Davison, A.C. & Smith, R.L. (1990). Models for exceedances over high thresholds (with discussion), *J. R. Statist. Soc. B*, 52, 237–254.

Egozcue J.J i Ortego, M.I (2003). An Bayesian estimation of natural hazards using asymptotic excess distributions. *Proceedings of the Anual Conference of the International Association for Mathematical Geology*, Portsmouth-2003

Embrechts, p., kluppelberg, c.and mikosch, T. (1997). *Model-ling Extremal Events for Insurance and Finance*. Berlin:Springer-Verlag.

Galapatti, R., 1983. A depth integrated model for suspended transport. Report 83-7, Communications on Hydraulics. Delft University of Technology, Department of Civil Engineering.

Generalitat de Catalunya. (2007). Pla de ports de Catalunya 2007-2015. Departament de Territori i Sostenibilitat.

Gómez, J.; Espino, M.; Sánchez-Arcilla, A.; Solano, M. and Vela, J. (2005), Extreme wave conditions in a torrential climate. The catalan case., The fifth international symposium on ocean wave measurements and analysis. Waves 2005.

Holthuijsen, L.H., Booij, N., Ris, R.C., 1993. A spectral wave model for the coastal zone, Proc., 2nd Int. Symp. on Ocean Wave Measurement and Analysis, New Orleans, 630-641.

Jimenez, J.A., Sanchez-Arcilla, A., Valdemoro, H., Gracia, V., Nieto, F., 1997. Processes reshaping the Ebro delta. Marine Geology 144, 59-79.

Jevrejeva, S., Grinsted, A., Moore, J.C., 2014. Upper limit for sea level projections by 2100. Environmental Research Letters 9, doi:10.1088/1748-9326/9/10/104008.

Mori, N., Shimura, T., Yasuda, T., Mase, H., 2013. Multi-model climate projections of ocean surface variables under different climate scenarios—future change of waves, sea level and wind. Ocean Engineering 71, 122-129.

Roelvink, J.A., Reniers, A.J.H.M., Dongeren, A.R.V., van Thiel de Vries, J.S.M., McCall, R., Lescinski, J., 2009. Modeling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. Coastal Engineering 56.

Sallenger, A.H., 2000. Storm Impact Scale for Barrier Islands. Journal of Coastal Research 16(3), 890-895.

Stive, M.J.F., Dingemans, M.W., 1984. Calibration and verification of a one-dimensional wave energy decay model. Delft Hydraulics, Delft, The Netherlands.

Sierra, J.P i Casas-Prat, M. (2014) Analysis of potential impacts on coastal areas due to changes in wave conditions. *Climatic Change*. (124): 861-876.

van Rijn, L.C., 2007. Unified view of sediment transport by current and waves, part I, II, III and IV. *Journal of Hydraulic Engineering* 133(6,7), 649-689 (part I & part II), 761-793 (part III & part IV).

Vellinga, P., 1986. Beach and Dune Erosion during Storm Surges. Delft University of Technology.

Zijlema, M., 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.

Wright, L.D., 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.