

8 Sistemes costaners i dinàmica litoral

Autors

Agustín Sánchez-Arcilla

Vicente Gracia

Joan Pau Sierra

Manel García-León

César Mösso

Agustín Sánchez-Arcilla és doctor enginyer de camins, canals i ports per la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), i catedràtic del Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental de la UPC. Des del 1990 és director del Laboratori d'Enginyeria Marítima (LIM/UPC), en el qual desenvolupa l'activitat investigadora en l'àmbit de l'enginyeria marítima (portuària i costanera). És vicepresident del Centre Internacional d'Investigació dels Recursos Costaners (CIIRC). Ha publicat més de quinze llibres i més de cent trenta articles en revistes nacionals i internacionals.

Vicente Gracia és geòleg i doctor en ciències del mar per la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), en la qual és professor agregat del Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental. És investigador sènior al Laboratori d'Enginyeria Marítima (LIM/UPC) i al Centre Internacional d'Investigació dels Recursos Costaners (CIIRC). Ha participat en vint projectes d'investigació i en dotze contractes de transferència universitat-empresa. Ha estat l'investigador principal del projecte europeu iCoast i ha publicat cinc capítols de llibre, divuit articles d'investigació en revistes nacionals i internacionals i més de cinquanta informes tècnics.

Joan Pau Sierra és doctor enginyer de camins, canals i ports per la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). Actualment, és catedràtic d'universitat a la UPC. Ha participat en onze projectes europeus, uns vint projectes nacionals de recerca i uns cinquan-

ta contractes de recerca aplicada per a empreses i administracions públiques. Com a resultat d'això, ha publicat més de setanta articles en revistes científiques, quinze capítols de llibre i unes dues-centes comunicacions en congressos.

Manuel García-León és enginyer de camins, canals i ports per la Universitat Politècnica de Catalunya (2012), i màster en enginyeria civil per la mateixa universitat (2013). Ha participat en tres projectes europeus (RISES-AM-, iCoast i DANCERS) i en el desenvolupament d'algoritmes de previsió i diagnòstic de l'estat actual i futur del litoral català. Les seves publicacions inclouen dos capítols de llibre, tres articles de revista, més de quinze comunicacions a congressos internacionals i deu informes tècnics.

César Mösso és doctor en ciències del mar per la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), i professor agregat del Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental de la UPC. Des del 1995 és investigador sènior al Laboratori d'Enginyeria Marítima (LIM/UPC) i al Centre Internacional d'Investigació dels Recursos Costaners (CIIRC), on desenvolupa l'activitat investigadora en l'àmbit de l'enginyeria marítima (portuària i costanera). Ha publicat quaranta articles en revistes internacionals, quaranta-una publicacions amb avaluació externa resultant de congressos, setanta-tres comunicacions en congressos i vint-i-cinc informes d'investigació.

Síntesi

Aquest capítol tracta de la projecció dels impactes de climes futurs per a trams vulnerables de la costa catalana. Al començament, s'hi revisa la geodiversitat de la costa en termes meteorològics i geològics. El ventall d'impactes que en resulta (sota climes presents i futurs) presenta uns nivells d'incertesa que s'han de considerar per a poder prendre decisions. L'anàlisi es basa en les projeccions del nivell mitjà del mar i en les característiques de l'onatge per a les famílies d'escenaris RCP (trajectòries de concentracions representatives). La projecció dels impactes d'erosió i inundació per a platges i d'agitació i ultrapassament per a

ports permet determinar quin és el domini costaner sotmès a aquests impactes, i també quins seran els nivells de risc que es poden esperar en platges i ports. Les conclusions del capítol s'estructuren com un seguit d'actuacions seqüencials per a afavorir la sostenibilitat de la costa. Aquest «camí d'adaptació» permetrà d'assolir uns nivells de riscos presents i futurs explícits, que han de ser considerats per a les activitats socioeconòmiques de la zona litoral.

Paraules clau

clima costaner, erosió, inundació marina, ultrapassament, agitació portuària

8.1. Introducció

Els sistemes costaners són dinàmics i contenen una elevada diversitat, tant natural com antròpica. La seva resposta a factors meteorològics i oceanogràfics és molt variada, tant per a climes presents com, particularment, per a climes futurs. Això implica que els nivells de risc futurs (producte de la perillositat per la vulnerabilitat i l'exposició) associats a les activitats socioeconòmiques de la zona costanera presentaran una variabilitat important. No obstant això, no permet de posposar la planificació d'una estratègia per a afavorir la sostenibilitat de la costa davant d'un canvi de clima. Això és especialment cert per a la costa catalana, que proporciona un ventall important de serveis naturals per a les activitats humanes al litoral.

L'objectiu d'aquest capítol és projectar els impactes ocasionats pel nivell del mar i les tempestes d'onatge sobre la costa catalana. Per això es comença analitzant les principals característiques morfoodinàmiques (associades a l'evolució geològica a curt termini) d'aquesta costa i els escenaris climàtics futurs (component físic, RCP) del Grup Intergovernamental d'Experts en Canvi Climàtic (IPCC). A partir d'aquí, es consideren els impactes potencials, primer per a les platges i després per als ports. Això permet de cobrir els dos principals sectors d'activitat costanera en els quals l'impacte del clima afectarà directament els nivells de risc. Per il·lustrar aquestes projeccions s'han triat exemples d'alta vulnerabilitat (amb un nivell de danys produït per un factor o conjunt de factors), tant de platges (per exemple, zones deltaiques) com de ports (per exemple, dics amb ultrapassaments freqüents). Les àrees més vulnerables són les platges urbanes, que tenen una capacitat reduïda d'autodefensa, i les zones deltaiques, que la manca de sediment causada per la regulació dels rius i la baixa topografia i subsidència fa sensibles als impactes combinats de l'erosió i la inundació.

L'impacte sobre platges i ports es basa en la funcionalitat (per exemple, l'ample de platja o l'ultrapassament o volum que passaria per sobre d'una estructura portuària) i en la resistència (per exemple, l'estabilitat davant d'un canvi en el nivell del mar o en les característiques de l'onatge). L'aplicació d'aquesta anàlisi a la costa catalana ha permès

d'il·lustrar els nivells futurs de risc per a diferents escenaris climàtics en funció de la tipologia de platja o port que es consideri. Per tal de limitar els nivells de risc que es poden esperar en un futur proper, serà necessari planificar un seguit d'actuacions esglaonades en el temps (per exemple, primer aportar sediment artificialment i després retrocedir ordenadament). Aquesta seqüència o pla s'anomena *camí d'adaptació* i s'explora al final del capítol, el qual finalitza amb unes recomanacions d'adaptació per a afavorir la sostenibilitat futura de la costa.

8.2. Sistemes costaners i dinàmica litoral

8.2.1. Geodiversitat de la costa catalana

El litoral català té una longitud aproximada de 700 km i presenta una gran varietat d'ambients litorals. Hom hi pot trobar des de platges de sorra, de gra fi o gruixut, (obertes, tancades, petites o llargues), fins a penya-segats rocallosos. A grans trets, les principals unitats morfològiques que hom pot distingir són, de sud a nord: a) el delta de l'Ebre i la costa sorrenca baixa de la Costa Daurada i el Garraf; b) el tram central Barcelona-Maresme, de platges de sorra gruixuda, fortament fragmentat per la presència de ports i espigons, i c) les cales, platges encaixades i penya-segats al nord.

Les platges, a causa de la seva naturalesa dinàmica, són els sistemes més susceptibles als efectes del canvi climàtic. Catalunya disposa d'uns 256 km de platges (59 km a la província de Girona, 79 km a la de Barcelona i 118 km a la de Tarragona), la major part de les quals (150 km) es troben en ambients urbans. Les platges urbanes són limitades per un passeig marítim o per altres tipus d'infraestructures, com ara carrers, carreteres, vies fèrries i cases. En els últims anys, la construcció i el manteniment de passejos marítims ha estat una de les principals inversions realitzades.

Per la seva singularitat, el delta de l'Ebre, amb 51 km de costa amb interrupcions antròpiques mínimes, representa l'ambient natural de major rellevància. La Costa Daurada i el Garraf presenten, com a tret diferencial, platges llargues de baixa cota i de sorra fina. La part central de la costa es troba sota la influència de la zona metropolitana de

Barcelona i conté la major part dels ports esportius i assentaments urbans. L'activitat econòmica de la zona ha creat un paisatge costaner molt fragmentat a conseqüència de les infraestructures portuàries i de diverses intervencions de protecció.

D'acord amb les dades del Centre Internacional d'Investigació dels Recursos Costaners (CIIRC, 2010), les platges de Catalunya es distribueixen al llarg de vint-i-dues cel·les litorals, és a dir, d'unitats fisiogràfiques sense intercanvis de sediment en els contorns laterals. D'acord amb el mateix estudi, la platja mitjana de Catalunya fa uns 37 m d'amplada, té una mida de gra de 0,7 mm i un pendent de la cara de la platja d'1/10. La distribució espacial de sediments (de 0,2 mm a 1,8 mm) reflecteix, en part, les diferències en les característiques dels rius i rieres que històricament han actuat com a fonts de sediments a la costa. Així doncs, les platges dins l'àrea d'influència de rius llargs i/o amb grans conques de drenatge (l'Ebre, el Llobregat i el Ter) presenten una mida de gra fina, mentre que les platges originalment alimentades per cabals sòlids efímers (en general molt curts i, per tant, amb un pendent elevat) presenten una mida del sediment més gruixuda. La construcció de ports i obres de defensa, juntament amb la dràstica reducció de la capacitat de transport sòlid dels rius (a causa d'una forta regulació dels cabals), ha pertorbat aquest model de distribució del sediment. Aquest nou escenari ha obligat a mantenir artificialment les platges per a seguir donant suport al turisme que s'hi desenvolupa.

El sistema portuari català es compon de més de cinquanta infraestructures portuàries, de les quals dues corresponen a autoritats portuàries, dues són ports industrials i la resta conformen el sistema de ports esportius i d'activitat pesquera (desenvolupada en disset instal·lacions), gestionat directament o indirectament per la Generalitat de Catalunya, amb una oferta de més de 28.000 amarratges.

El ventall de dimensions dels ports és molt ampli: inclou des de ports de petites dimensions, com el port esportiu de Cala Canyelles, amb 134 amarratges i una bocana de 4 m de fondària, fins al port de Mataró, amb capacitat per a 1.080 embarcacions i una bocana situada a 8 m de profunditat. Les

obres de recer les conformen, principalment, dics en talús d'esculleres o elements de formigó, en els ports més grans. Les cotes de coronació (el nivell més alt de l'estructura) es troben, normalment, entre els 4 m i els 8 m, atesa la condició d'obres no ultrapassables.

L'impacte d'aquesta xarxa en l'economia catalana i espanyola és evident. Així, per exemple, el port de Barcelona es troba entre els primers ports del món com a base per a turisme de creuers i és un dels ports més importants en moviment de mercaderies de la Mediterrània, ja que significa l'1,4 % del valor afegit brut català. En aquesta línia, els ports de la Generalitat de Catalunya van tenir uns ingressos per prestació de servei d'uns 14 M€ durant l'exercici 2014 (Ports de la Generalitat, 2014).

8.2.2. «Pressions» considerades

8.2.2.1. El nivell del mar

Per a ser conscients de l'evolució del nivell del mar, es pot fer una comparació entre les projeccions fetes per l'IPCC al *Quart informe d'avaluació* o AR4 (IPCC, 2007) i les del *Cinquè informe d'avaluació* o AR5 (IPCC, 2013). Així, en l'AR4, en l'escenari més benigne (el B1), els models preveïen increments de 18 cm a 38 cm per al període 2081-2100 respecte al període 1980-1999, és a dir, pujades entre 1,7 mm/any i 3,6 mm/any. En el pitjor escenari de l'AR4 (l'A2), les projeccions indicaven increments de 26 cm a 59 cm cap a final del segle XXI, cosa que significaria pujades entre 2,5 mm/any i 5,6 mm/any. En l'escenari intermedi A1B, considerat un dels més versemblants, les previsions indicaven increments de 21 cm a 48 cm a final de segle, o bé pujades entre 2,0 mm/any i 4,6 mm/any. D'altra banda, per a un escenari relativament benigne de l'AR5 (RCP2.6), les projeccions indiquen increments de 26 cm a 55 cm per al període 2081-2100 respecte al període 1986-2005, que representen pujades entre 2,7 mm/any i 5,8 mm/any. Per tant, el millor escenari actual preveu pujades del nivell del mar similars a les del pitjor escenari de l'AR4. En el pitjor escenari actual (RCP8.5), les pujades projectades varien entre els 45 cm i els 82 cm, fet que significa augments de 4,7 mm/any a 8,6 mm/any. Els canvis entre l'AR4 i l'AR5 no es deuen a canvis en els escenaris d'emissions; de fet, els es-

cenaris de l'AR4 (B1, A1B i A2) són prou semblants als escenaris de l'AR5 (RCP1.3, RCP6.0 i RCP8.5, respectivament). La raó dels increments del nivell mitjà del mar són les noves estimacions, més altes, de la quantitat de gel continental que es pot fondre en cada escenari d'emissions.

Cal tenir en compte que les xifres esmentades fan referència a mitjanes globals. Els canvis passats indiquen que, geogràficament, la pujada del nivell del mar no és uniforme a causa de diversos factors, entre els quals hi ha la circulació oceànica, per la qual cosa també es preveu que tampoc no ho serà en el futur (Slangen *et al.*, 2014, entre d'altres). Si bé encara no hi ha projeccions detallades a escala regional, sí que es pot dir que en l'informe de l'IPCC del 2013 els mapes sobre la 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. La major part de les projeccions regionals disponibles a hores d'ara corresponen a l'AR4, i encara no hi ha projeccions detallades a escala regional per a l'AR5. Malgrat això, i a partir de les dades del Med-CORDEX, s'han obtingut estimacions que situen el nivell mitjà de la mar Mediterrània entre els valors globals i 10 cm per sobre, a causa de la sobreelevació de l'Atlàntic NE, cosa que forçaria, per mitjà d'intercanvis de massa amb la Mediterrània, aquesta diferència relativa a la mitjana global (Gomis *et al.*, 2015).

Un altre factor a considerar és la variació en els nivells de terra, ja que, en realitat, el que és rellevant és la pujada relativa del nivell del mar. Els nivells de terra es poden moure cap a dalt o cap a baix a causa de pujades isostàtiques, moviments tectònics i subsidència. En el cas de Catalunya, com a la resta de zones costaneres mediterrànies, aquesta última causa predomina en els ambients deltaics, en els quals cal esperar una pujada relativa del nivell del mar superior a l'ocasionada només per la variació del nivell oceànic.

Finalment, cal tenir en compte que, a escala regional, els potencials canvis en els patrons atmosfèrics (camps de vent i pressió) poden induir canvis en el nivell del mar i en els patrons de marees meteorològiques. Les primeres avaluacions d'aquests efectes, basades en les projeccions de

l'AR5, s'estan duent a terme, però tots els estudis fets a partir d'escenaris de l'AR4 indiquen que els canvis en la contribució de pressió i vent sobre el nivell del mar mitjà de la Mediterrània serien petits a final d'aquest segle (Jordà *et al.*, 2012).

8.2.2.2. L'onatge

Pel que fa a l'onatge, l'obtenció de projeccions regionalitzades basades en l'AR5 està, actualment, en curs. La major part de les projeccions existents a l'àrea de la Mediterrània es basen en l'AR4 (Casas-Prat *et al.*, 2013). En el cas de la costa catalana, Casas-Prat *et al.* (2013) van obtenir el clima d'onatge projectat al nord-oest de la Mediterrània per a l'escenari A1B (AR4), utilitzant cinc combinacions de models globals (GCM) i regionals (RCM) de circulació atmosfèrica, amb una elevada resolució espacial (25 km) i temporal (3 h). En aquest estudi es va obtenir una reducció de la mediana de l'altura d'ona significant (*Hs*) a la major part del domini, que es correspon amb una disminució de la velocitat del vent a gran part de la Mediterrània occidental. No obstant això, a latituds properes al golf de Gènova, l'increment projectat per a la velocitat mitjana del vent produiria un augment de la mediana de la *Hs* en aquella zona. A més a més, el clima d'onatge mostra patrons molt diferents a l'estiu (per la qual cosa la mediana de la *Hs* augmentaria a la part sud de la costa) respecte de l'hivern.

Els resultats de Casas-Prat *et al.* (2013) són coherents amb els obtinguts per Lionello *et al.* (2008) per a l'escenari A1B. En general, els canvis màxims que es poden esperar a la costa catalana, tant anualment com estacionalment, segons les projeccions obtingudes per a aquest escenari, estan al voltant del $\pm 10\%$ per a condicions mitjanes (la mediana de la *Hs*) i del $\pm 20\%$ per al clima extrem. Els resultats també projecten canvis en la distribució de les freqüències direccionals.

8.2.3. Impactes projectats (metodologia)

8.2.3.1. Els impactes a les platges

La interacció entre els agents impulsors, fonamentalment el nivell mitjà i l'onatge, amb el sediment existent (mitjançant la morfologia del fons) i el sediment aportat (mitjançant el cabal sòlid de rius i rieres, o artificialment) conforma el que ano-

menem *morfodinàmica*. Qualsevol modificació en algun d'aquests elements modifica els altres. Així, per exemple, un augment de l'altura de l'onatge en trencants comporta un increment del transport de sediment i una redistribució de la sorra, tant en planta com en perfil, que alhora modifica les característiques de l'onatge incident. Aquesta complexa relació té lloc a diferents escales de temps i espai.

Els estudis de dinàmica litoral simplifiquen el problema analitzant de manera aïllada alguna de les escales en què s'identifiquen els processos més rellevants (Stive *et al.*, 2002). Així, en el domini temporal parlem de canvis a curt termini (o episòdics), a mitjà termini i a llarg termini.

Els canvis episòdics reflecteixen l'impacte dels temporals d'onatge a la costa i solen afectar des de centenars de metres fins a kilòmetres de costa. Els processos i les perillositats més rellevants són l'erosió i la inundació induïdes per l'acció combinada de les ones i el nivell mitjà del mar. En ambdós casos, els processos són entesos des d'un punt de vista fonamentalment transversal a la platja. Els canvis a mitjà termini s'associen a una escala de temps d'anys i poden afectar trams de costa de diversos kilòmetres. A aquestes escales, l'erosió induïda per l'onatge és un dels principals processos associats, i té un component marcadament longitudinal (els canvis induïts pel transport longitudinal de sediment en són l'element principal). Finalment, es parla de *canvis a llarg termini* quan l'escala temporal d'integració és de centenars d'anys. Novament, l'erosió és el procés més rellevant, que en aquest cas afecta trams de costa de desenes de kilòmetres. A aquesta escala, el nivell mitjà del mar és el factor determinant d'aquests canvis, i el procés es considera en una dimensió transversal.

8.2.3.1.1. L'EROSIÓ DE LES PLATGES

Generalment, l'erosió de la costa és considerada un problema quan impedeix o dificulta alguna de les funcions bàsiques d'una platja, que bàsicament consisteixen a: a) ser el suport físic d'un seguit d'ecosistemes naturals (funció natural), b) protegir de l'acció de les onades les infraestructures que es troben al darrere (funció de protecció) i c) ser el domini en el qual es desenvolupa la major part de l'activitat turística (funció recreativa). La major part de les activitats antròpiques es concentren a la

zona emergida (platja seca) i poc fonda de la platja, a fondàries no superiors als 3 m. Per aquest motiu, l'evolució de la línia de la costa, i més concretament el retrocés, té una gran utilitat a l'hora d'avaluar-ne els impactes. L'ample de platja emergida és una de les altres variables d'interès, perquè indica el grau de protecció que un tram de costa pot arribar a oferir en unes condicions d'alta energia.

L'erosió expressa la diferència negativa entre la quantitat de sediments entrant i sortint en un determinat volum de platja. En aquest balanç, cal definir els intervals de temps i espai sobre els quals es realitza la integració. Així, per exemple, a escala episòdica, un temporal acostuma a portar associat un retrocés de la línia de la costa. Des del punt de vista de la gestió de costes es considera que el temporal ha causat una erosió i, per tant, es dissenyen les mesures compensatòries necessàries per a seguir amb l'activitat existent. No obstant això, si aquests canvis s'integren en tot el perfil, mantenint l'escala de temps, el balanç que en resulta és zero, perquè el que realment s'ha produït és una redistribució del sediment des de la part emergida del perfil cap a zones més profundes. Aquest sediment es pot tornar a incorporar a la part superior del perfil de la platja o a platges adjacents sempre que es donin les condicions hidrodinàmiques adequades (un onatge reconstructor que indueixi un transport de sediment cap a terra), si bé el procés té lloc a una escala de temps superior, de mesos o anys. Una de les maneres habituals d'avaluar els canvis originats per l'onatge incident és utilitzar models numèrics de transport transversal de sediments.

A mitjà termini, l'erosió de la costa expressa el dèficit de sediment que resulta de la integració dels canvis a l'escala d'unes poques desenes d'anys dins d'una cel·la litoral (de diversos kilòmetres) o tram de costa. Un exemple pot ser l'erosió observada a les platges del Prat i de Gavà, dins la cel·la litoral 8 (CIIRC, 2010). L'efecte barrera del port de Barcelona i el port Ginesta, la quasi nul·la aportació de sediment útil per part del riu Llobregat i l'existència d'una fondària a partir de la qual els canvis són irrellevants (profunditat de tancaament) produeixen l'aïllament sedimentari d'aquest tram de costa. El resultat és un seguit de platges amb diverses orientacions, a causa de l'orogra-

fia existent, amb una quantitat de sorra limitada i sotmeses als corrents induïts pel trencament de l'onatge i el transport del sediment associat. Aquestes orientacions permeten de diferenciar la cel·la en un seguit de trams més petits, en els quals el transport longitudinal de sediment és diferent i, per tant, pot esdevenir erosiu, com passa a la platja de Gavà. La interacció de l'onatge amb altres estructures, com per exemple el dic de recer del port de Barcelona, pot provocar un increment de les taxes de transport i augmentar els punts erosius o generar-ne de nous, com és el cas de la platja del Prat. De manera integrada, la cel·la presenta un balanç nul, malgrat que la dinàmica litoral local hagi generat l'erosió d'alguns trams en els quals surt més sorra pels contorns laterals de la que entra. El càlcul de la dinàmica longitudinal de sediment té, com es pot veure, una importància vital a l'hora de quantificar els canvis d'una platja a aquesta escala. Hi ha una gran quantitat d'equacions que determinen el transport longitudinal de sediments en un tram de costa a causa de l'acció de les onades en trencants, si bé la fórmula del Centre de Recerca en Enginyeria Costanera (CERC) i la de Kamphuis (USACE, 2006) són dues de les més utilitzades en el camp de l'enginyeria de costes.

A llarg termini, es considera que els canvis de la platja són governats per les variacions del nivell mitjà del mar. Aquests canvis afecten desenes de kilòmetres de costa i són més visibles quan s'integren en períodes de temps llargs (centenars d'anys). Una de les aproximacions més utilitzades per a explicar els canvis que experimenta la costa quan varia el nivell mitjà del mar és el model de comportament proposat per Bruun (USACE, 2006). Tot i així, aquest model també s'ha posat en dubte, i se n'han proposat diverses modificacions. Bruun suggereix l'existència d'un perfil en equilibri (invariable respecte a l'onatge incident) que respon aixecant-se i retrocedint quan es produeix un augment del nivell mitjà 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).

Els impactes del canvi climàtic sobre el comportament erosiu d'una platja comporten avaluar-lo,

forçosament, des d'un punt de vista numèric, definint en cada cas l'escala temporal i espacial d'estudi. Així, les possibles variacions de les característiques actuals dels temporals (en l'altura, el període, la direcció o la freqüència d'aparició de l'onatge) s'han d'analitzar des d'un punt de vista local. A mitjà termini cal abordar la problemàtica tenint en compte el càlcul del transport longitudinal de sediments corresponent a un nou clima d'onatge, mentre que a llarg termini l'erosió és tractada de manera més regional, aplicant la regla de Bruun.

8.2.3.1.2. LA INUNDACIÓ (MARINA) DE LA COSTA

Les zones topogràficament baixes, com ara l'àrea costanera, són susceptibles de patir inundacions d'origen fluvial o marí. La combinació de totes dues resulta, normalment, de condicions agreujades tant pel nivell de la inundació com per la durada i la intensitat. En aquest capítol, només considerem la inundació d'origen marí, atès que els rius principals, com ara l'Ebre, estan molt regulats i que les inundacions «impulsives», del tipus *flash-flood*, típiques de les rieres d'aquesta zona mediterrània, queden fora de l'abast d'aquesta anàlisi.

La remunta de l'onatge es defineix com la cota màxima respecte al nivell mitjà del mar que assoleix una onada en incidir sobre una platja. Si el valor de la remunta supera la cota superior de la platja, es produeix un ultrapassament de l'onada i, consegüentment, una inundació de la part posterior. Les aproximacions de càlcul més utilitzades expressen la remunta com una relació entre el pendent de la platja i el peralt de l'onatge (una recopilació de les funcions més utilitzades es pot trobar a USACE, 2006).

En ambients costaners urbanitzats, i Catalunya n'és un exemple, la inundació costanera pot comportar grans pèrdues econòmiques derivades del malmetement d'infraestructures que no estan dissenyades per a resistir canvis, sobtats o lents, en l'acció del mar (Gracia *et al.*, 2014; Sánchez-Arcilla *et al.*, 2014; García-León *et al.*, 2015). La inundació pot tenir lloc en condicions de temporal i/o nivell mitjà del mar alt, i està fortament relacionada amb la topografia local. Si l'onatge incident és suficientment gran i persistent, pot produir la remodelació de la part superior d'una platja, i la

pot fer més vulnerable a aquest procés. Per això, l'estudi de la inundació se sol realitzar a partir de la definició d'un conjunt d'escenaris hidrodinàmics (combinació d'ones i nivell mitjà del mar) i de morfologia de la costa (configuració de la platja més desfavorable) que representin les condicions teòriques d'interès.

La pujada del nivell del mar dibuixada en els diferents escenaris de canvi climàtic incidirà directament en la capacitat de resistència de la costa davant de l'acció de la remunta, ja que disminueix la cota en la qual es troba el punt més elevat del terreny i, per tant, el nivell topogràfic de l'última defensa. D'altra banda, en ambients costaners molt baixos, com per exemple els deltes, la simple pujada del nivell mitjà del mar pot arribar a inundar grans extensions.

Com es pot veure, doncs, l'efecte del canvi climàtic sobre la inundació costanera és doble: per mitjà dels canvis en les condicions d'onatge de temporal (un efecte episòdic que pot ser positiu o negatiu), i per mitjà de la pujada del nivell mitjà del mar.

8.2.3.2. Els impactes als ports

8.2.3.2.1. IMPACTES CAUSATS PER LA VARIACIÓ DEL NIVELL DEL MAR

Els principals impactes directes potencials de la pujada relativa del nivell del mar als ports són l'ultrapassament dels dics de recer i la inundació de molls i superfícies portuàries. Addicionalment, la variació del nivell del mar modifica la profunditat de l'aigua als voltants dels ports i, per tant, els patrons de propagació de l'onatge, cosa que afecta, potencialment, l'estabilitat i el soscavament dels dics, l'aterrament (entrada de sediments) i l'agitació (ones a l'interior del port). En aquests casos, els canvis poden ser positius o negatius, i requereixen un estudi específic per a cada cas.

Un dels efectes més impressionants de la pujada del nivell del mar sobre els ports és l'increment de l'ultrapassament dels dics, a causa de la reducció del francbord o distància vertical entre la cota de coronació de l'estructura i el nivell del mar. La quantitat d'ultrapassament tolerable depèn de l'estructura i, concretament, de les activitats, instal·lacions i béns que hi ha al costat interior del dic.

L'existència de carreteres, edificis, magatzems o vaixells atracats imposa condicions més restrictives en el cabal d'ultrapassament admissible (USA-CE, 2006). El cabal que ultrapassa una estructura marítima és fruit de la morfologia de l'estructura, del francbord i de l'altura d'ona que hi arriba. Per a estimar aquest cabal hi ha diversos mètodes, incloent-hi models numèrics, expressions empíriques i xarxes neuronals (USACE, 2006).

D'altra banda, la reducció del francbord dels molls causada per la pujada del nivell del mar pot afectar els ports, i pertorbar les operacions d'atracament de vaixells i la càrrega o descàrrega de mercaderies. A més a més, alguns molls o infraestructures, com ara carreteres i vies de tren, es poden inundar sempre que es trobin en una cota inferior al nivell del mar, i poden afectar i interrompre potencialment els accessos al port i les operacions que hi tenen lloc.

8.2.3.2.2. IMPACTES CAUSATS PER CANVIS EN ELS PATRONS D'ONATGE

A més de la pujada del nivell del mar, cal tenir en compte, també, que les interaccions atmosfèriques complexes produïdes per l'efecte d'hivernacle poden modificar els patrons de vent i de pressió atmosfèrica i, per tant, l'onatge (Wang *et al.*, 2009). En els darrers anys, s'han portat a terme diversos estudis que han analitzat els impactes potencials dels canvis en els patrons de l'onatge sobre àrees costaneres concretes, alguns centrats en l'erosió costanera (Casas-Prat *et al.*, 2015) i d'altres centrats en els impactes sobre l'operativitat portuària (Casas-Prat *et al.*, 2010 i 2012). Sierra *et al.* (2014) han analitzat, també, els principals impactes que les alteracions en els patrons d'onatge poden produir en les infraestructures costaneres, incloent-hi els ports. Segons aquest estudi, els principals impactes potencials són els canvis en l'agitació, l'aterrament del port, l'ultrapassament, el soscavament i la pèrdua d'estabilitat de les estructures portuàries.

Per a poder portar a terme les seves operacions, els ports han de minimitzar la inactivitat provocada per condicions climàtiques adverses de vent, corrents i, en particular, l'onatge a dins del port. L'estudi de l'agitació a dins del port (variacions causades per ones de curt període) només es pot

dur a terme mitjançant models numèrics o físics, a causa de la complexitat dels fenòmens implicats.

D'altra banda, molts ports d'arreu del món pateixen problemes d'aterrament, fet que implica despeses costoses de dragat. La taxa d'aterrament és fruit d'una combinació de processos: corrents mareals, arrossegament horitzontal, corrents de densitat i efectes barrera per als corrents longitudinals (USACE, 2006). L'aterrament produït per qualsevol d'aquests processos és afectat per la disponibilitat de sediment fora del port i pels fluxos d'aigua que poden mobilitzar aquests sediments cap a la bocana del port. Suposant que la quantitat de sediment és il·limitada, Sierra *et al.* (2014) han mostrat que l'aterrament és particularment sensible a canvis en l'altura d'ona i, en menys grau, a canvis en la direcció de l'onatge.

El soscavament consisteix en l'eliminació del material granular del fons en les proximitats de les estructures marítimes a causa de forces hidrodinàmiques que arrossegueu el material. Aquest procés pot ocasionar danys parcials o, en alguns casos, el col·lapse de part o de tota l'estructura (USACE, 2006), i depèn directament de l'altura d'ona: les ones més altes produeixen taxes de soscavament més grans. També depèn del talús de l'estructura i de la profunditat relativa a la qual està situada: els talussos més grans produeixen més reflexió i, per tant, més soscavament; també, les estructures localitzades en aigües més someres estan sotmeses a més erosió del material de la base. Tenint en compte això, els dics de ports situats en aigües poc profundes i amb pendents grans seran els més afectats pel soscavament a causa de canvis en les altures d'ona.

L'estabilitat estructural també es pot veure afectada per modificacions en el clima d'onatge. En el cas de dics en talús, el disseny es basa en el càlcul del pes dels blocs del mantell principal, que és proporcional al cub de l'altura d'ona significant a la localització de l'estructura. Això implica que petits increments en l'altura d'ona generaran grans augments en el pes necessari per als blocs del dic. En el cas dels dics verticals, l'augment de l'altura d'ona produirà tensions més grans sobre l'estructura, reduirà els coeficients de seguretat en el lliscament i en la bolcada i, eventualment, en produirà

el col·lapse. Pel que fa al cabal d'ultrapassament de les estructures portuàries, es relaciona directament amb la magnitud de les ones que incideixen sobre l'estructura. Sierra *et al.* (2014) han trobat que l'ultrapassament és, de fet, el procés més afectat pels canvis en l'altura de les ones, seguit per l'estabilitat de les estructures.

Finalment, hi ha altres impactes potencials sobre els ports que aquí no s'analitzen, tot i que també mereixen una menció: a) la pujada de temperatura pot fer que a l'estiu es multipliquin els casos de blooms d'algues, amb tot el que això comporta, i b) el fet que cada dia s'emprin vaixells de més envergadura fa que siguin més sensibles al vent; es poden perdre més dies d'operativitat a causa de la incidència directa del vent sobre els vaixells.

En qualsevol avaluació de l'impacte del canvi climàtic sobre els ports, s'haurà de tenir en compte, per tant, la combinació de diferents mecanismes generadors d'impacte, com ara la pujada del nivell del mar i els canvis en els patrons d'onatge. En el cas que ambdós factors tinguin lloc simultàniament, es generaran interaccions no lineals que només es podran calcular per a cada lloc i geometria estructural concrets. En alguns casos, com el de l'ultrapassament, un nivell del mar més alt amb ones més grans potenciarà els impactes negatius sobre el port. En altres casos, la superposició d'ambdós canvis no és tan clara, i fins i tot es podrien compensar entre si. Per exemple, la pujada del nivell del mar modificarà els patrons de propagació de l'onatge i podria reduir el coeficient de somatge o *shoaling* en una magnitud similar a l'increment de l'altura d'ona en aigües fondes a causa del canvi climàtic. El resultat seria un impacte negatiu negligible sobre la infraestructura i la gestió del port.

8.2.4. Aplicació a les zones costaneres

8.2.4.1. El domini costaner

Per a qualsevol aplicació a la zona costanera cal definir-ne, primer, els contorns. Aquesta zona, frontera entre mar i terra, caracteritza l'acció simultània de factors marins i terrestres. Malgrat això, el domini costaner des del punt de vista geomorfològic és diferent que des del punt de

vista ecològic, des del qual es considera la zona costanera com un ecotò o zona de transició entre ecosistemes terrestres i marins. Des del punt de vista econòmic, la zona costanera es caracteritza pels usos i recursos que comporta el sistema socioeconòmic establert.

Amb el canvi de clima, la pujada del nivell mitjà del mar provocarà pèrdues importants de zones costaneres baixes, tal com il·lustra la figura 8.1. Això implicarà una evolució cap a terra endins del límit superior de l'acció dels factors marins, un dels criteris base per a la definició de la zona costanera des del punt de vista geomorfològic. El resultat pot ser un domini costaner que inclogui edificis i infraestructures i que no sigui, per

tant, compatible amb la dinàmica natural. Aquest punt queda il·lustrat a la figura 8.2, per al cas d'una ciutat costanera com és Barcelona. Així, la definició del domini costaner i l'aplicació de les anàlisis a aquesta zona requereixen considerar, també, la variabilitat i els contorns d'aquest domini. Per exemple, els canvis que experimenta la frontera entre factors terrestres i marítics en condicions de calma i en condicions de tempesta; o en condicions de clima present i amb un nivell mitjà del mar 1 m per sobre de l'actual. La definició del domini també ha de considerar la incertesa, ja que el nivell mitjà del mar projectat per a diferents escenaris pot arribar a valors ben diferents, segons el nivell de probabilitat que es decideixi considerar. Com a il·lustració, la ten-

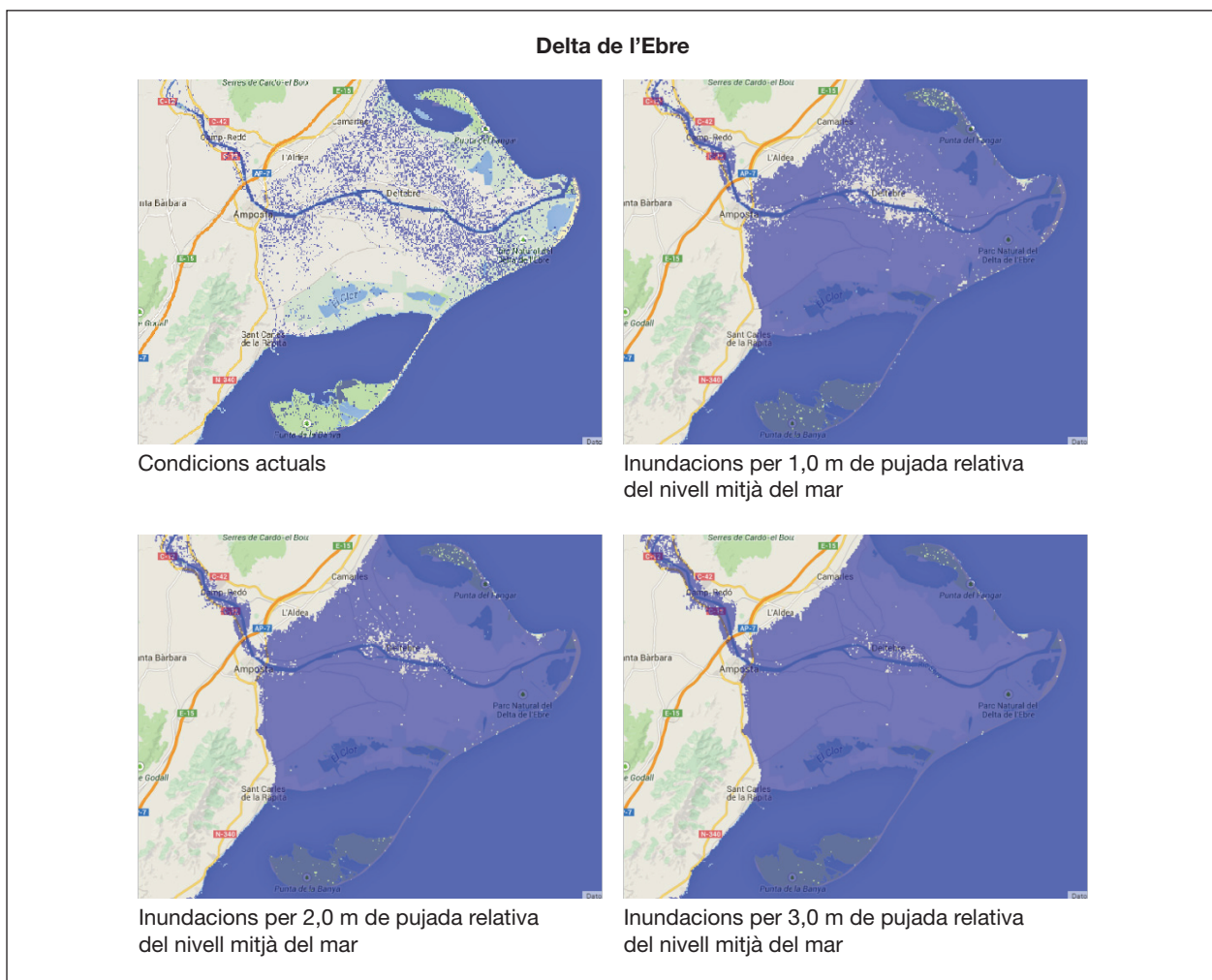


FIGURA 8.1. Efecte de l'increment relatiu del mar en el delta de l'Ebre. El delta actual figura al costat superior esquerre. Les inundacions causades per 1,0, 2,0 i 3,0 m d'increment relatiu figuren a continuació, calculades tenint en compte que el delta no respon al canvi relatiu dels nivells terra-mar i que, per tant, es pot aplicar un model del tipus «banyera» (*bathtub* o inundació simple), que implica que no hi ha cap reacció del perfil de platja. El nivell relatiu correspon a un increment del mar de fins a 2,0 m i a una subsidència de fins a 1,0 m. Això permet una anàlisi de sensibilitat, sense associar aquests nivells a un horitzó temporal determinat. La topografia prové d'un model digital del terreny, obtingut a partir d'imatges de l'Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC).



FIGURA 8.2. Evolució de la línia de vora de platja de la Barceloneta, causada per la pujada del nivell del mar, considerant una platja de sorra (cas teòric) i l'existència d'infraestructures rígides (cas real).

dència central de la pujada del nivell mitjà del mar global en l'escenari RCP8.5 és de prop de 0,80 m per al final d'aquest segle respecte del passat, mentre que el valor del quantil 95 % és d'1,8 m, considerant com a variable aleatòria el nivell mitjà del mar obtingut de diferents models per a l'escenari RCP8.5.

En resum, qualsevol aplicació a la zona costanera requerirà considerar, simultàniament: a) la variabilitat, b) la incertesa i c) el diferent domini, segons que el concepte de zona costanera sigui geomorfològic, ecològic o econòmic.

8.2.4.2. Risc a les platges

L'efecte del canvi climàtic sobre l'erosió a mitjà termini ha estat analitzat a partir de l'estudi del transport longitudinal de sediments induït per l'onatge. Casas-Prat *et al.* (2012), a partir de les tendències observades en els règims d'onatge (obtinguts dins el projecte europeu HIPOCAS, Hindcast of dynamic process of the ocean and coastal areas of Europe, com a projecció retrospectiva del període 2001-1958), determinen el clima d'onatge per a l'any 2050 sobre diferents punts de la costa i el transport longitudinal induït per aquest. Els autors conclouen que, per a l'any 2050, el comportament

general del transport longitudinal del sediment al llarg de la costa de Catalunya serà similar a l'observat fins ara, si bé de magnitud inferior a causa d'una disminució de la freqüència d'aparició d'onatges dels sectors N i NE i d'un augment dels elements S, SE i SO. Localment, els mateixos autors detecten, per a l'any 2050, un canvi del sentit net de transport en alguns trams de la costa. Al sud de Catalunya, les variacions respecte de la situació actual són menys pronunciades. Com a resum, la major part de les platges catalanes pateixen una erosió que, com a mitjana per a tota la costa, se situa entre els 0,60 i 0,90 m/any. La major part de l'extensió de les platges és sotmesa a erosió i una part petita experimenta accreïció, principalment causada per l'efecte barrera d'estructures artificials, com ara espigons i dics de recer.

Els resultats del transport longitudinal són utilitzats pels mateixos autors per a avaluar el potencial d'erosió i d'acreció de les diferents cel·les en les quals es divideix la costa de Catalunya (figura 8.3). La projecció per a l'any 2050 mostra que el 26 % de la costa manté la mateixa condició d'acumulació o accreïció, mentre que el 31 % experimentarà una millora (s'hi produirà més accreïció). Del percentatge de més del 70 % de les platges on es produirà un canvi respecte de les condicions inicials, el 42 % empitjorarà (patirà més erosió) i el 58 % experimentarà una millora.

Els efectes del canvi climàtic sobre l'erosió causada pels temporals (escala episòdica) han estat analitzats per Bosom (2014), considerant la vulnerabilitat de la costa com a element de defensa a mitjà i a llarg termini. A mitjà termini, es considera que les característiques de la platja són dominades per la dinàmica litoral (transport longitudinal de sediments), mentre que a llarg termini aquestes característiques les representa la contribució combinada de la subsidència de la costa i l'increment del nivell mitjà del mar. Als càlculs es considera la probabilitat de l'erosió, condicionada pels temporals d'un escenari climàtic.

Considerant la contribució del transport longitudinal, l'any 2060 les platges de Catalunya tindran uns 140 km de costa molt vulnerables als efectes dels temporals, en comparació dels 61 km actuals (Bosom, 2014). El Montsià, el Baix Ebre, el Tarragonès i el Baix Penedès són les comarques amb

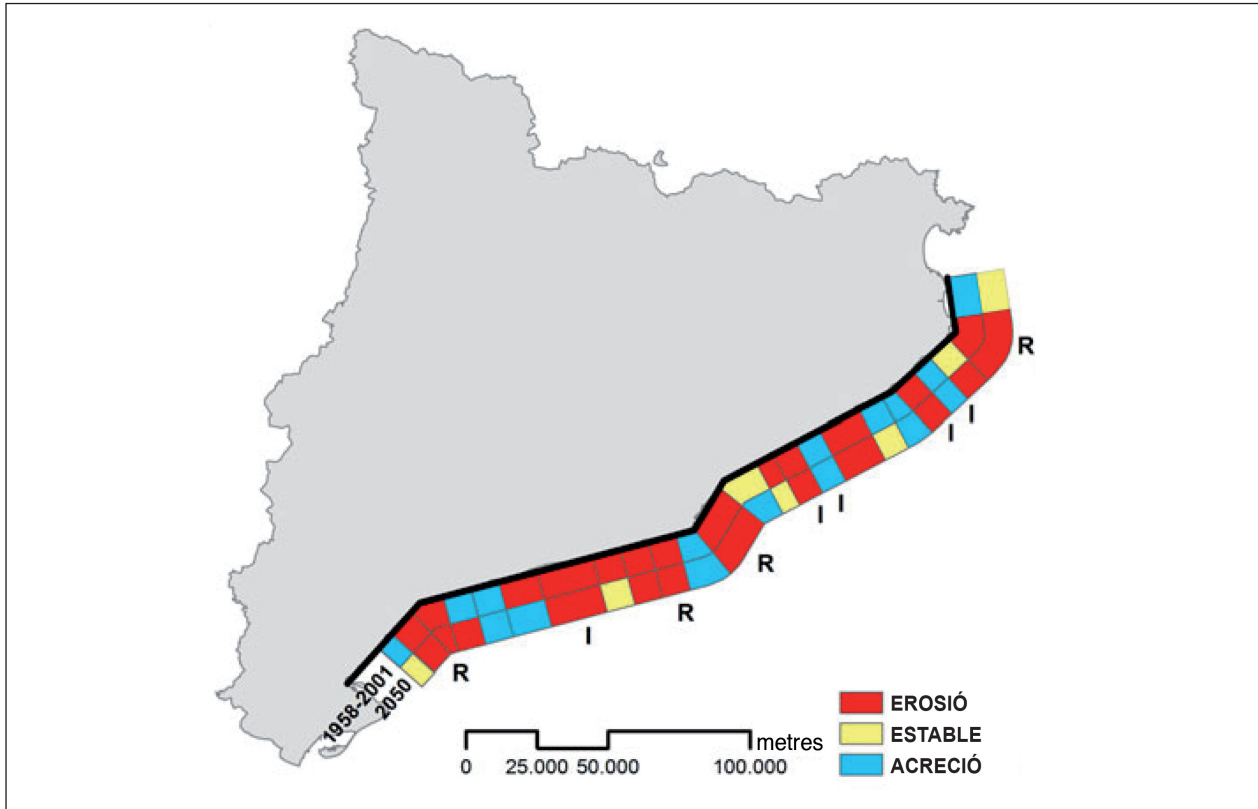


FIGURA 8.3. Comportament de la costa a mitjà termini present (període 1958-2001) i en un escenari de canvi climàtic, l'any 2050 (I (intensificació): designa trams costaners on l'efecte del canvi climàtic intensifica l'erosió. R (reducció): correspon a trams de costa on l'efecte del canvi climàtic produeix una reducció de l'erosió).

Font: Casas-Prat *et al.*, 2012.

un augment més significatiu (l'augment màxim es presenta al Montsià, amb 65 km de costa respecte dels 3 km actuals). Tenint en compte l'efecte de l'increment relatiu del nivell mitjà del mar, aquest treball determina que, en el cas d'un increment de 5,9 mm/any i d'una subsidència d'1,5 mm/any i de fins a 3 mm/any per al delta de l'Ebre (CADS, 2008; Ibáñez *et al.*, 2010; Jiménez *et al.*, 1997), el 49 % de la costa de Catalunya esdevindrà vulnerable o molt vulnerable a l'erosió provocada per l'acció dels temporals. De manera combinada, tenint en compte l'evolució de la costa causada tant pel transport longitudinal com per l'increment relatiu del nivell mitjà del mar, Catalunya tindria uns 164 km de costa (sobre un total de 218 km analitzats) amb una vulnerabilitat alta o molt alta a l'erosió. Destaca la comarca de l'Alt Empordà, amb el 100 % de la costa afectada.

Els efectes del canvi climàtic sobre la inundació marina a l'escala regional han estat estudiats recentment per Bosom (2014), Sánchez-Arcilla *et al.* (2014) i Sierra *et al.* (2014). Si bé les metodologies

utilitzades són diferents, tots els resultats mostren un augment significatiu dels episodis d'inundació i una extensió més gran de costa afectada. Així, Bosom (2014) calcula que l'any 2060 el 67 % de la costa serà vulnerable o molt vulnerable a la inundació associada a un període de retorn de cinquanta anys, principalment les comarques del Montsià, el Baix Ebre, el Maresme i l'Alt Empordà. Sánchez-Arcilla *et al.* (2014) determinen que, fins i tot mantenint la configuració actual de la costa, amb la pujada del mar (d'acord amb l'escenari A1F1 de l'IPCC, 2007) l'any 2100 el 21 % de les platges de Catalunya requeriran mesures d'actuació addicionals. Sierra *et al.* (2014) analitzen l'impacte d'una variació del $\pm 20\%$ en l'altura d'ona del temporal acompanyada per una variació del $\pm 10\%$ en el període, i conclouen que aquests canvis poden representar una variació del $\pm 20\%$ en l'extensió susceptible de ser inundada.

Més recentment, Gracia *et al.* (2015) han abordat l'estudi de la inundació des d'un punt de vista probabilístic, tenint en compte la incertesa associada

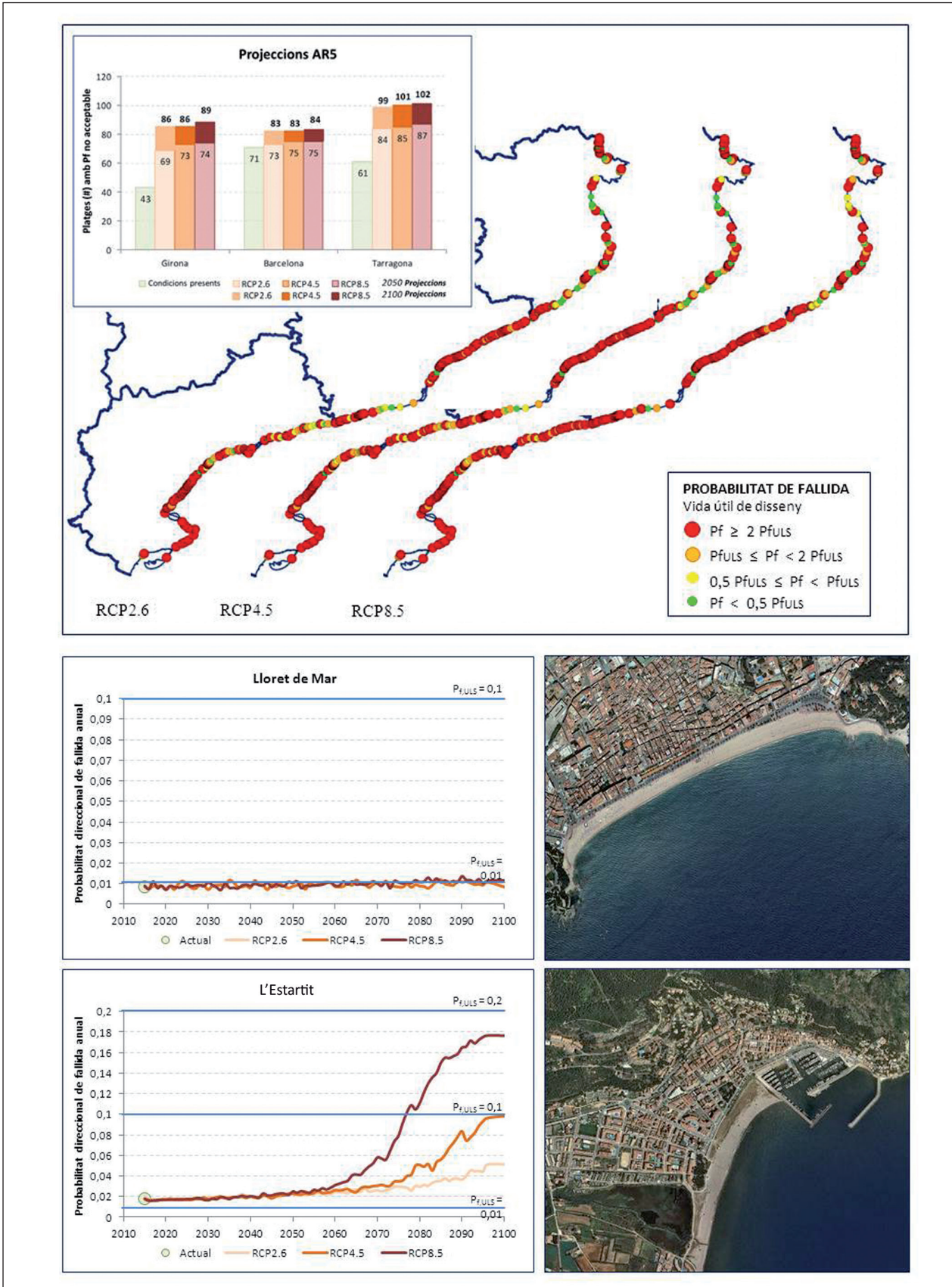


FIGURA 8.4. a) Probabilitat de fallida (Pf) de platges (comparada amb la Pf de l'estat límit últim o ULS) al llarg del litoral català per als escenaris RCP2.6, RCP4.5 i RCP8.5 projectats fins a l'any 2100, i nombre de platges per nivell de Pf per a les tres províncies costaneres a Catalunya. Pf (diagrama de barres). b) Variació temporal de la probabilitat d'inundació de la platja de Lloret de Mar (superior) i de l'Estartit (inferior) per a diferents escenaris de canvi climàtic.

a les variables involucrades (la morfologia, el nivell del mar i les característiques del temporal). Això els ha permès determinar la probabilitat d'inundació de les diverses platges de sorra de Catalunya per als diversos escenaris d'increment del nivell del mar global de l'IPCC (2013). La metodologia proposada ha estat validada a partir d'un registre històric d'inundacions de la costa. Els autors tenen en compte un clima d'onatge semblant al present i el manteniment de les característiques morfològiques actuals. Els resultats (figura 8.4.a) mostren que, en qualsevol dels nous escenaris (RCP2.6, RCP4.5 i RCP8.5), el nombre de platges que no compleixen amb la funció de protecció augmenta a les tres províncies. Així, en el cas més desfavorable (RCP8.5), la província de Girona passa de tenir 43 platges que actualment s'inunden de manera episòdica a tenir-ne 74, l'any 2050, i 89, l'any 2100. Tarragona passaria a tenir-ne 87, l'any 2050, i 102, l'any 2100, en les quals es produirien inundacions inacceptables en moments de temporal, en comparació amb les 61 platges on actualment aquest procés ja s'esdevé. La metodologia proposada pels autors permet definir estratègies de gestió a llarg termini, ja que identifica el període en el qual

la costa començarà a patir inundacions inacceptables des del punt de vista de la gestió (figura 8.4.b).

La inundació també pot ser entesa com un element purament hidrostàtic. La figura 8.5 evidencia que, per a la costa mediterrània espanyola, i en particular per a les costes valenciana i catalana, la major part de la pèrdua de domini costaner emergit en kilòmetres quadrats es produeix pel primer metre de pujada del nivell mitjà del mar. L'anàlisi mostra que, per a pujades relatives de 2 m o fins i tot de 3 m, l'extensió addicional de territori perdut és molt més reduïda. S'ha de considerar que la vulnerabilitat depèn del nivell relatiu terra-mar; així, els 3 m que es mostren a la figura resulten d'una pujada del nivell de mar de fins a 2 m i d'un enfonsament o subsidència del substrat costaner de fins a 1 m.

El risc resultant de l'erosió i la inundació de platges és degut, per tant, a la probabilitat o perillositat que es produeixi el fenomen multiplicat per les conseqüències, incloent-hi l'exposició de persones, infraestructures i béns i serveis en general. El resultat és una afectació de les funcions prin-

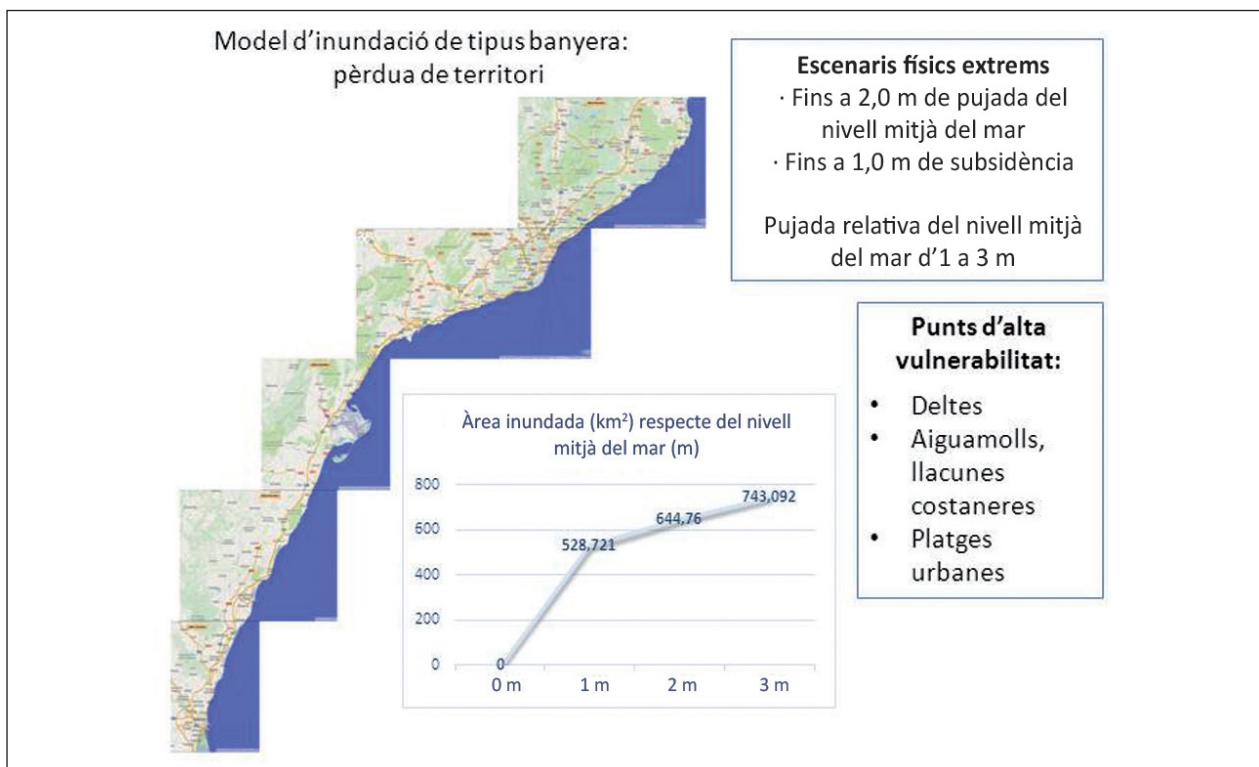


FIGURA 8.5. Efecte de la pujada del nivell mitjà del mar per a la costa de Catalunya i de la Comunitat Valenciana (kilòmetres quadrats que quedarien inundats en cas d'una pujada relativa del nivell del mar d'1 m, 2 m i 3 m) a partir del treball del grup, fent servir els mateixos nivells relatius terra-mar de figures anteriors i un model digital d'elevació del terreny.

cipals de la platja, que es poden resumir en: a) funció de protecció, b) funció de suport turístic i c) funció de suport ecològic. A causa de la dificultat d'arribar a una valoració econòmica que inclogués totes tres funcions, en aquest apartat no s'ha fet cap estimació. Malgrat això, qualsevol valoració econòmica hauria d'anar associada a l'escala temporal per a la qual s'han calculat les pèrdues de valor en qualsevol d'aquestes funcions.

8.2.4.3. Risc als ports

Utilitzant mètodes empírics, Sierra *et al.* (2015a) han analitzat l'impacte de la pujada del nivell del mar sobre l'ultrapassament en 43 dels 47 ports marítics existents a la costa catalana. Considerant la manca d'estudis sobre com resultaran afectats els ports pel canvi climàtic al nostre país, s'ha fet un plantejament en termes de sensibilitat, en funció dels diferents escenaris projectats per a la costa catalana, perquè siguin raonables des del punt de vista de les projeccions físiques existents per a les nostres latituds. L'anàlisi s'ha portat a terme tenint en compte les condicions actuals (escenari 0), una pujada del nivell del mar corresponent a la banda central de l'escenari RCP4.5, una altra amb el valor superior de l'escenari RCP8.5 i, finalment, una que representa un escenari extrem (*high-end scenario*) molt superior a les previsions de l'AR5. Es considera un escenari extrem perquè hi ha estudis que suggereixen pujades fins a 1,86 m (Mori *et al.*, 2013, entre d'altres). Jevrejeva *et al.* (2014) indiquen que una pujada tan extrema del nivell del mar és físicament possible; aquesta probabilitat és molt baixa, de prop del 5 %, però no és negligible. Les pujades considerades per a cadascun dels escenaris tinguts en compte en l'estudi de Sierra *et al.* (2015a) són: a) escenari 0: condicions ac-

tuals; b) escenari 1: RCP4.5 (escenari 0 + 0,47 m); c) escenari 2: RCP8.5 (escenari 0 + 0,88 m), i d) escenari 3: escenari extrem (escenari 0 + 1,80 m).

En l'estudi es va assumir que l'onatge no variaria en el futur, i es van definir els valors tolerables d'ultrapassament per a cada port. Els cabals d'ultrapassament es van calcular per a diferents períodes de retorn: un any, per a tempestes relativament freqüents; cinc anys, per a tempestes relativament intenses, i cinquanta anys, per a tempestes excepcionals. En funció del percentatge d'excedència del valor tolerable, que és indicatiu del nivell de danys que cal esperar, es van definir cinc nivells de vulnerabilitat: molt baixa, baixa, mitjana, alta i molt alta. Els resultats obtinguts es resumeixen a la taula 8.1, mentre que la figura 8.6 mostra els mapes de vulnerabilitat (definida d'acord amb les conseqüències econòmiques de l'impacte) corresponents a un període de retorn de cinc anys. S'hi pot veure que una pujada moderada del nivell del mar ja afecta significativament la vulnerabilitat (en nivell i en nombre de ports afectats), i que una pujada elevada similar al de l'escenari extrem incrementaria el nivell de risc a l'ultrapassament a molts dels ports de la costa catalana.

Resumint, en els escenaris més probables de pujada del nivell del mar (escenaris 1 i 2, basats en projeccions de l'AR5) els cabals d'ultrapassament augmentarien significativament en molts ports catalans, i el nombre de ports vulnerables creixeria en algunes unitats, particularment per tempestes de mitjana o gran intensitat. Això afectaria l'operativitat portuària i podria comportar problemes seriosos de gestió. En el cas del poc probable escenari 3, la situació empitjoraria significativament. Una altra conclusió de l'estudi esmentat és que la major part dels

TAULA 8.1. Nombre de ports catalans amb algun grau de vulnerabilitat a l'ultrapassament (total) i amb un nivell alt o molt alt de vulnerabilitat (AV) davant de tempestes amb períodes de retorn d'un any, cinc anys i cinquanta anys

Període de retorn	ESCENARI 0		ESCENARI 1		ESCENARI 2		ESCENARI 3	
	AV	Total	AV	Total	AV	Total	AV	Total
Un any	1	3	2	4	2	4	5	8
Cinc anys	1	5	2	8	3	9	6	11
Cinquanta anys	6	10	9	11	10	13	13	20

Nota: els resultats corresponen a un nivell mitjà del mar present (escenari 0), RCP4.5 (escenari 1), RCP8.5 (escenari 2) i extrem d'1,80 m (escenari 3). L'onatge és, en tots els casos, el corresponent a les condicions presents.

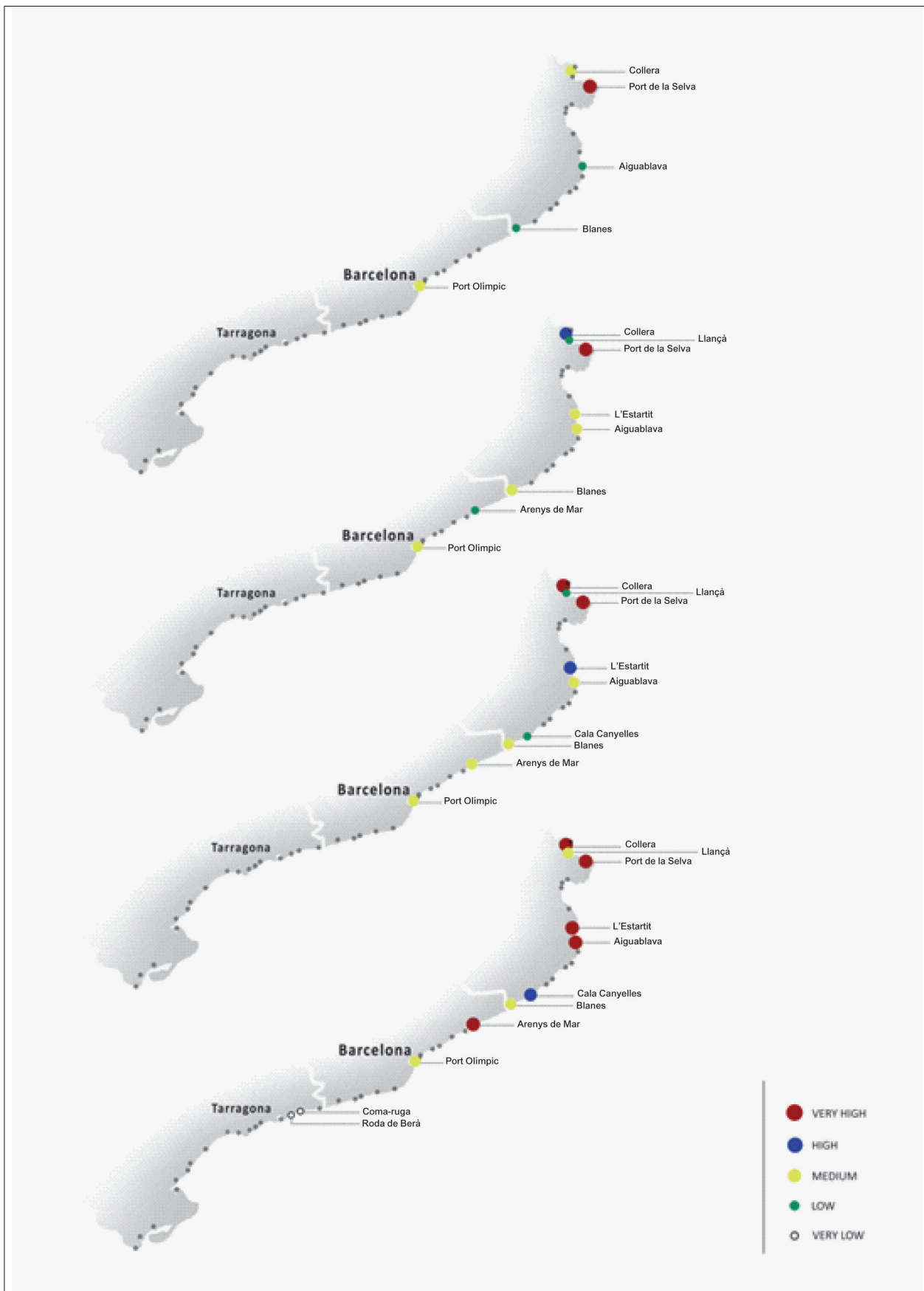


FIGURA 8.6. Mapa d'impacte de l'ultrapassament dels ports catalans per a un període de retorn de cinc anys i per a les condicions següents: a) clima present, b) RCP4.5, c) RCP8.5 i d) escenari extrem (1,80 m de pujada del nivell mitjà del mar).

ports amb problemes potencials d'ultrapassament es localitzen en la meitat nord de la costa catalana.

D'altra banda, Sierra *et al.* (2015b) han aplicat recentment un model numèric de tipus Boussinesq a tretze ports de la costa catalana. El model utilitza projeccions d'onatge obtingudes per Casas-Prat *et al.* (2013) amb el model SWAN per a cinc combinacions de models de circulació atmosfèrica general (GCM) i regional (RCM), basats en l'escenari A1B de l'AR4 (IPCC, 2007). La figura 8.7 mostra els resultats per a un dels ports (Cases d'Alcanar) situat al sud de la costa catalana: es pot apreciar un cert increment

de l'agitació per a quatre dels cinc models emprats, mentre que per al cinquè les variacions són molt petites i en ambdós sentits (increments i disminucions de l'altura d'ona a dins del port).

En el seu estudi, Sierra *et al.* (2015b) han trobat que l'agitació mitjana anual disminueix en els ports situats al sector central de la costa catalana (entre un 0,3 % i un 12,9 %), mentre que en els ports situats més al nord i més al sud l'agitació mitjana anual s'incrementa (entre un 0,6 % i un 9,6 %). L'anàlisi estacional mostra una disminució generalitzada de l'agitació a l'hivern (entre un 3,3 % i un 20,1 %) i un

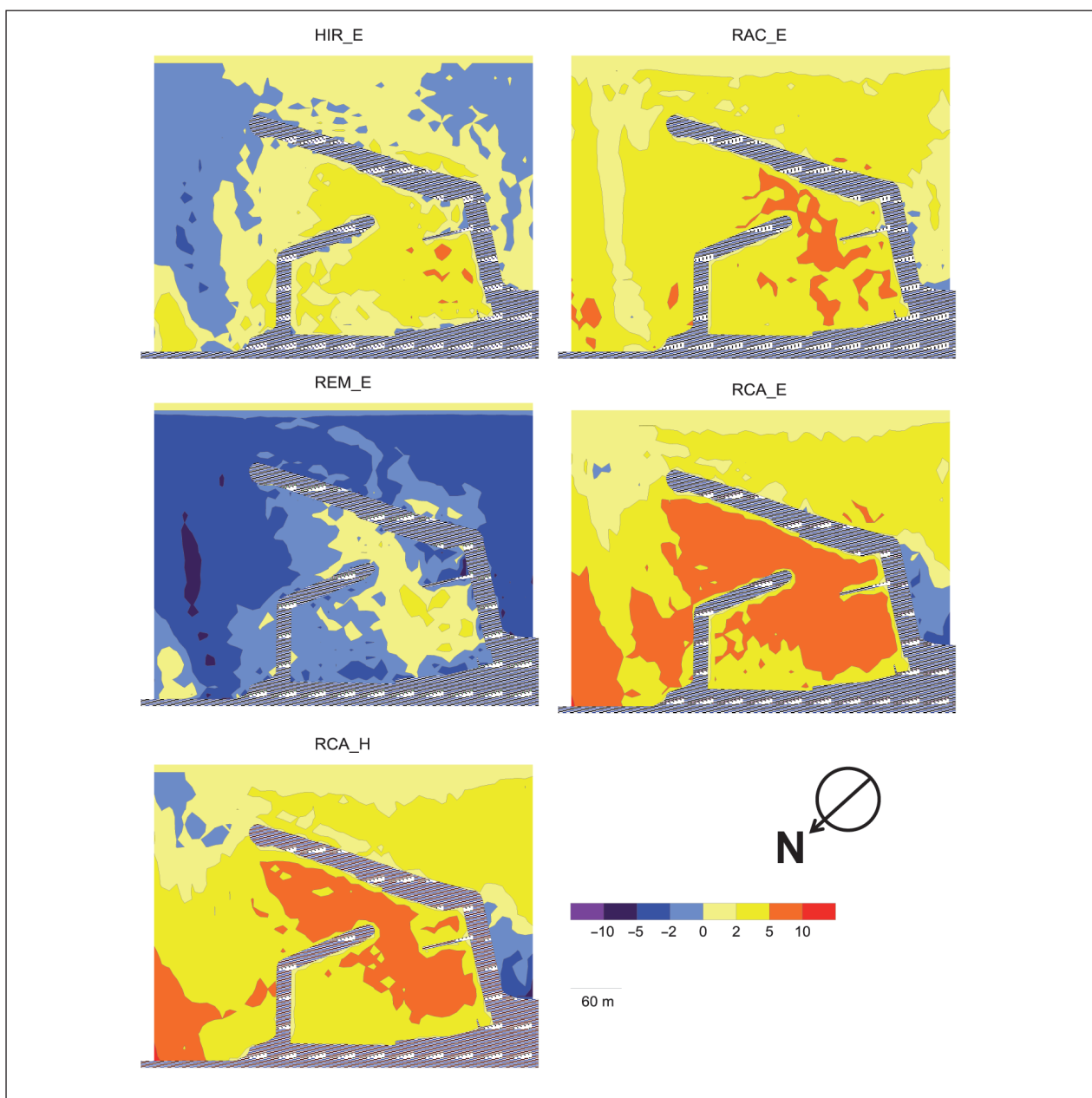


FIGURA 8.7. Diferències (en percentatge) entre l'altura d'ona significant futura (2071-2100) i present (1971-2000) al port de Cases d'Alcanar per als cinc models climàtics emprats. Totes les simulacions corresponen a l'escenari A1B de l'AR4.

increment generalitzat a l'estiu (entre un 1,1 % i un 13,1 %). Cal tenir en compte que els valors esmentats són valors mitjans i, consegüentment, hi ha zones en les quals la variació és significativament més gran. Aquest comportament implicarà una disminució de l'agitació a l'hivern i un augment a l'estiu, que, per tant, en termes absoluts, serà petit. Les implicacions per als ports són, en general, positives pel que fa a l'agitació interna, malgrat que pot donar lloc a futurs problemes d'operativitat i de gestió en alguns ports, sobretot als esportius, per als quals l'estiu és l'estació amb una taxa d'ocupació més alta (97 %).

A la figura 8.8 es mostra la variació mitjana (mitjana dels cinc models) de l'altura d'ona significant per als dos ports més importants de Catalunya: el de Barcelona i el de Tarragona. Les variacions s'indiquen segons el percentatge de variació en el futur (període 2071-2100) respecte al present (període 1971-2000). Es pot apreciar que al port de Tarragona l'agitació disminuiria, en el futur, a pràcticament tot el domini, tret d'una zona en la qual es registren increments molt lleugers. En el cas de Barcelona, si bé predomina la reducció de

l'altura d'ona significant a bona part del domini, hi ha àrees extenses (per exemple, tot el Port Vell) en les quals es registren increments de l'agitació, i hi ha una dàrsena en la qual tenen lloc augments que superen el 10 % i que, per tant, poden plantejar problemes d'operativitat, malgrat la tendència general de reducció a l'hivern.

8.3. Conclusions

Aquest estudi del canvi climàtic al litoral català ha tractat de determinar els impactes de les variacions de l'onatge i del nivell del mar sobre platges sorrenques i ports. Respecte als patrons d'onatge, en l'escenari A1B de l'AR4 s'observaria una reducció de la mediana de l'altura d'ona en la major part del domini català, tot i que a prop del golf de Gènova es detecta un augment. A més, durant l'estiu els valors de la mediana de l'altura d'ona augmenten al sud del domini. El clima d'onatge d'un any típic presenta variacions del $\pm 10\%$ sobre els valors de la mediana, mentre que en condicions de temporal s'observen canvis en un rang més alt, entre el $\pm 20\%$.

L'impacte del canvi climàtic a les platges s'ha avaluat en termes d'erosió i inundació marina. L'erosió

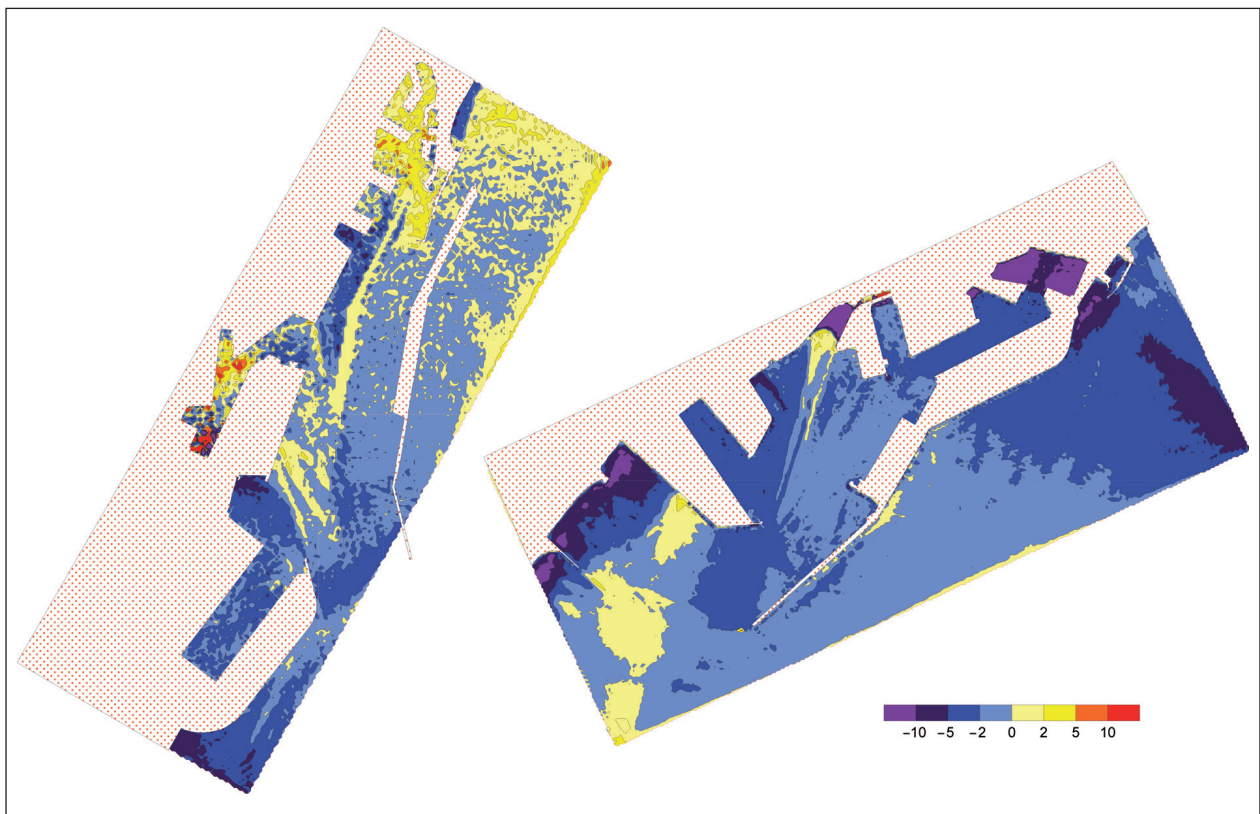


FIGURA 8.8. Diferències (en percentatge) entre l'altura d'ona significant futura (2071-2100) i present (1971-2000) als ports de Barcelona (esquerra) i Tarragona (dreta), fent la mitjana dels cinc models.

induïda per condicions d'onatge mitjanes a causa del transport longitudinal de sediment s'ha obtingut a partir de la projecció de les tendències observades en les sèries d'onatge presents. El motiu és doble: d'una banda, la incertesa en la determinació de la variabilitat (extrems) a partir de dades projectades, i de l'altra, la tendència a la disminució de l'energia de l'onatge, la qual cosa comportaria uns impactes més reduïts. Els patrons obtinguts per a l'any 2050 són similars als actuals. Al sud del domini les variacions són menys pronunciades. El resum és que el 26 % de la costa manté el mateix comportament, mentre que el 31 % experimentarà una millora de les condicions. Del percentatge de més del 70 % de les platges on es produirà un canvi respecte de les condicions inicials, en el 42 % els canvis són cap a pitjor, i en el 58 %, cap a millor.

La combinació del transport longitudinal i la modificació dels nivells relatius terra-mar comportaran un augment, tal com s'ha plantejat en els apartats anteriors, dels trams de platja amb vulnerabilitat alta o molt alta, amb especial menció del tram nord de la costa catalana. Igualment, els episodis d'inundació augmentaran tant en intensitat com en percentatge de costa afectada. Fins i tot mantenint la configuració costanera actual, serà necessari plantejar mesures d'actuació addicionals per a un percentatge important de platges que, d'altra manera, no compliran les funcions de protecció i d'ús turístic.

L'impacte als ports de Catalunya s'ha avaluat en termes d'ultrapassament, tenint en compte el clima d'onatge actual i diferents escenaris d'increment del nivell del mar (AR5), i també en termes d'agitació (escenari A1B de l'AR4). Respecte al primer, s'observa un augment significatiu dels cabals d'ultrapassament, i un augment, també, del nombre de ports vulnerables, en els quals l'operativitat pot quedar afectada. Aquest augment és més gran a la meitat nord de la costa. L'agitació mitjana anual disminuirà en els ports situats al sector central de la costa catalana (entre un 0,3 % i un 12,9 %), mentre que en els ports situats més al nord i més al sud l'agitació mitjana anual s'incrementarà (entre un 0,6 % i un 9,6 %). En el període d'hivern, l'agitació disminuiria entre un 3,3 % i un 20,1 %, mentre que a l'estiu, quan l'ocupació és més gran, augmentaria entre un 1,1 % i un 13,1 %.

Adicionalment, s'han de considerar altres factors climàtics que poden afectar les perillositats i vulnerabilitats del sistema costaner. Des del punt de vista físic, els principals serien l'augment de la temperatura i la minva de les disponibilitats d'aigua dolça, que, juntament amb les de sorra, implicarien un estrès addicional sobre la vora costanera. Des del punt de vista socioeconòmic, el principal factor seria l'augment de població projectat per a la zona costanera catalana, la qual cosa tindria implicacions tant per a ports com per a platges.

8.4. Recomanacions

L'adaptació de la costa al canvi climàtic ha de comportar una seqüència ordenada d'actuacions (tant de protecció com de retrocés o d'adaptació genuïna), de tal manera que el resultat per a un horitzó donat maximitzi la sostenibilitat de la zona costanera. Aquesta seqüència d'actuacions i l'organització temporal que se segueixi depèn, essencialment, del tipus de sistema costaner, que és radicalment diferent per a platges baixes de sorra o per a estructures portuàries.

La planificació de la zona costanera, per a adaptar-la al canvi de clima, s'ha de basar no solament en les «pressions» dels factors climàtics, sinó també en la resposta de la costa mateixa. Com a il·lustració, la figura 8.4.b mostra l'evolució de la probabilitat de fallida de dues platges catalanes en el segle XXI. S'ha definit *probabilitat de fallida* com la probabilitat que, en un nombre suficient de simulacions en escenaris climàtics futurs la platja emergida desaparegui (és a dir, que l'amplada disminueixi per sota d'un llinard), de tal manera que no quedi platja per a l'ús turístic ni un cordó de sorra protector per a defensar les infraestructures de l'interior de les tempestes de l'hivern. Com mostra la figura, per a platges encaixades i, per tant, amb un volum de sediment raonablement constant, la probabilitat de fallida en les condicions actuals i en els tres escenaris RCP principals (2.6, 4.5 i 8.5) són semblants, i no mostren cap evolució significativa en el temps. Per contra, per a una platja més lliure com la de l'Estartit, la probabilitat de fallida mostra un increment en el temps, més notable per a escenaris més adversos, com l'RCP8.5, per al qual la pujada del nivell mitjà del mar és més acusada.

La política d'adaptació ha de considerar l'horitzó temporal per al qual aquestes projeccions indiquen un augment important de la probabilitat de fallida. En el cas de l'escenari RCP8.5, aquest interval de temps seria al voltant del 2060, la qual cosa implicaria començar les actuacions uns quants anys abans, atès que qualsevol intervenció costanera (ja sigui amb estructures rígides com amb aportacions de sorra, planificació alternativa del territori o bé una combinació de totes tres) requereix un interval de temps d'anys per a permetre una execució eficient d'aquestes actuacions.

Per tant, en funció de l'escenari climàtic considerat i dels principals components de la vulnerabilitat costanera, es pot arribar a un càlcul de la probabilitat de fallida i de les conseqüències (per a tant risc). Això permetrà d'optimitzar, en termes de cost i impacte, les actuacions costaneres davant de l'efecte de climes futurs. Per a augmentar la fiabilitat del procés, serà convenient l'establiment d'un pla d'observació de la costa a llarg termini que compregui tant els agents impulsors o «pressions» (condicions meteorològiques a mar obert, onatge i nivell mitjà del mar) com la resposta de la costa i el comportament de les seves estructures. Pel que fa a l'escala episòdica, amb conseqüències econòmiques importants a curt termini, també seria recomanable l'establiment de sistemes d'alerta primerenca, per tal de mantenir uns nivells de risc acceptables en condicions de clima present i futur (Sánchez-Arcilla *et al.*, 2014; García-León *et al.*, 2015; Gracia *et al.*, 2015).

Referències bibliogràfiques

- BOSOM, E. (2014). *Coastal vulnerability to storms at different time scales: Catalan coast*. Tesi (doctorat). Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.
- CADS = CONSELL ASSESSOR PER AL DESENVOLUPAMENT SOSTENIBLE (2008). *RISKCAT: Els riscos naturals a Catalunya: Informe executiu*. Barcelona: CADS.
- CASAS-PRAT, M.; MCINNIS, K. L.; HEMER, M. A. [et al.] (2015, en revisió). «Inter-model variability in regional climate change projections of wave-driven coastal sediment transport». *Regional Environmental Change*.
- CASAS-PRAT, M.; SIERRA, J. P. (2010). «Trend analysis of wave storminess: Wave direction and impact on harbour agitation». *Natural Hazards & Earth System Sciences*, 10, p. 2327-2340.
- (2012). «Trend analysis of wave direction and associated impacts on the Catalan coast». *Climatic Change*, 115, p. 667-691.
- (2013). «Projected future wave climate in the NW Mediterranean Sea». *Journal of Geophysical Research Oceans*, 118, p. 3548-3568.
- CIIRC = CENTRE INTERNACIONAL D'INVESTIGACIÓ DELS RECURSOS COSTANERS (2010). *Estat de la zona costanera a Catalunya*. Barcelona: Generalitat de Catalunya. Departament de Política Territorial i Obres Públiques.
- GARCÍA-LEÓN, M.; GRACIA, V.; ROBICHAUX, L. [et al.] (2015). «Evaluation of transient defence measures against storms». *Proceedings of the coastal sediments*, ASCE (EUA).
- GOMIS, D.; MARCOS, M.; JORDA, G. [et al.] (2015) «Sea-level change in semi-enclosed basins. The case of the Mediterranean Sea». *European Climate Research Alliance: «New knowledge for risk reduction»*, Brussel·les (Bèlgica).
- GRACIA, V.; SÁNCHEZ-ARCILLA, A.; GARCÍA-LEÓN, M. [et al.] (2014). «A new generation of early warning systems for coastal risk. The iCoast Project». *Proceedings of the 34th International Conference on Coastal Engineering*, Seül (Corea del Sud).
- IBÁÑEZ, C.; SHARPE, P. J.; DAY, J. W. [et al.] (2010). «Vertical accretion and relative sea level rise in the Ebro delta wetlands (Catalonia, Spain)». *Wetlands*, 30, p. 979-988.
- IPCC = INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2007). *Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (AR4)*. Edició de S. Solomon, D. Qin, M. Manning [et al.]. Cambridge, etc.: Cambridge University Press. També disponible en línia a: <<http://www.ipcc.ch/report/ar4/wg1>> [Consulta: 20 febrer 2016].
- (2013). *Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel*

- on *Climate Change (AR5)*. Edició de T. F. Stocker, D. Qin, G. K. Plattner [et al.]. Cambridge, etc.: Cambridge University Press. També disponible a: <<http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1>> [Consulta: 20 febrer 2016].
- 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.
- JIMÉNEZ, J. A.; SÁNCHEZ-ARCILLA, A.; VALDEMORO, H. I. [et al.] (1997). «Processes reshaping the Ebro delta». *Marine Geology*, 144(97), p. 59-79.
- JORDÀ, G.; GOMIS, D.; ÁLVAREZ-FANJUL, E. [et al.] (2012). «Atmospheric contribution to Mediterranean and nearby Atlantic sea level variability under different climate change scenarios». *Global and Planetary Change*, 80-81, p. 198-214.
- LIONELLO, P.; COGO, S.; GALATI, A. [et al.] (2008). «The Mediterranean surface wave climate inferred from future scenario simulations». *Global and Planetary Change*, 63, p. 152-162.
- MORI, N.; SHIMURA, T.; YASUDA, T. [et al.] (2013). «Multi-model climate projections of ocean surface variables under different climate scenarios—future change of waves, sea level and wind». *Ocean Engineering*, 71, p. 122-129.
- PORTS DE LA GENERALITAT (2015). *Memòria econòmica 2014*.
- SÁNCHEZ-ARCILLA, A.; GÓMEZ, M.; GRACIA, V. [et al.] (2014). «Reliability analysis of beaches under a climate change scenario». *Proceedings of the 34th International Conference on Coastal Engineering*, Seül (Corea del Sud).
- SCHWARTZ, M. L.; FISHER, J. J. (ed.) (1980). *Proceedings of the Per Bruun Symposium*. Rhode Island: Rhode Island University.
- SIERRA, J. P.; CASANOVAS, I.; MÖSSO, C. [et al.] (2015a, en premsa). «Vulnerability of Catalan ports to overtopping produced by sea level rise». *Regional Environmental Change*.
- SIERRA, J. P.; CASAS-PRAT, M. (2014). «Analysis of potential impacts on coastal areas due to changes in wave conditions». *Climatic Change*, 124, p. 861-876.
- SIERRA, J. P.; CASAS-PRAT, M.; VIRGILI, M. [et al.] (2015b). «Impacts on wave-driven harbour agitation due to climate change in Catalan ports». *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15, p. 1695-1709.
- SLANGEN, A. B. A.; CARSON, M.; KATSMAN, C. A. [et al.] (2014). «Projecting twenty-first century regional sea-level changes». *Climatic Change*, 124(1-2), p. 317-332.
- STIVE, M. J. F.; AARNINKHOF, S.; HAMM, G. J. [et al.] (2002). «Variability of shore and shoreline evolution». *Coastal Engineering*, 47(2), p. 211-235.
- USACE = US ARMY CORPS OF ENGINEERS (2006). *Coastal engineering manual*. Washington DC: USACE.
- WANG, X.; SWAIL, V.; ZWIERS, F. [et al.] (2009). «Detection of external influence on trends of atmospheric storminess and northern oceans wave heights». *Climate Dynamics*, 32, p. 189-203.