

## B11. Zones costaneres: dinàmica sedimentària

**Agustín Sánchez-Arcilla**

**José A. Jiménez**

**Joan Pau Sierra**

Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental, Universitat Politècnica de Catalunya

**Agustín Sánchez-Arcilla Conejo** és doctor Enginyer de Camins per la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). Catedràtic de Ports i Costes del Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental (DEHMA) de la UPC. Des de 1990 és director del Laboratori d'Enginyeria Marítima (LIM/UPC) del DEHMA de la UPC, on desenvolupa les seves activitats de recerca en l'àmbit de l'enginyeria portuària i costanera. Fou un dels impulsors de la creació del Centre Internacional d'Investigació dels Recursos Costaners (CIIRC), del qual actualment és vicepresident.

En l'àmbit acadèmic, és professor a l'ETS d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de la UPC, on imparteix diverses assignatures en les titulacions d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports i d'Enginyeria en Obres Públiques. Impulsor i coordinador del Màster Internacional en Enginyeria i Gestió Portuària, del Màster Internacional en Gestió Portuària i del Doctorat interuniversitari en ciències del mar (UPC/UB/CSIC). Ha publicat prop de 15 llibres i més de 35 articles en revistes nacionals i internacionals. També ha dirigit 12 tesis doctorals.

Ha participat en més de 20 projectes de recerca europeus. Entre els projectes en què ha participat com a investigador principal destaquen *Dynamic of beaches* (1993-1995), *Impact of climate change on north-western Mediterranean deltas (MEDDELTA)* (1994-1996), *Fluxes Across Narrow Shelves. The Ebro delta case (FANS)* (1996-1998), *Spanish Access to large-scale facilities (SPANWAVE I / SPANWAVE II)* (1996-2000) i *Estuaries and coastal areas. Basis and tools for a more sustainable development (ECOSUD)* (2000-2003).

**José A. Jiménez** (Las Palmas de Gran Canaria, 1964) és doctor en Ciències del Mar per la Universitat Politècnica de Catalunya (any 1996), llicenciat en Ciències del Mar (ULPGC, 1987). Actualment és professor titular del Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental de la Universitat Politècnica de Catalunya, on duu a terme la seva tasca docent i investigadora.

Com a docent, imparteix assignatures a les escoles d'Enginyers de Camins, Canals i Ports, Enginyers Tècnics d'Obres Públiques i Enginyeria Geològica de la UPC, a diversos màsters i al Programa de doctorat interuniversitari en Ciències del Mar (UPC/UB/CSIC).

Ha participat en diversos projectes de recerca europeus en l'àmbit de la geomorfodinàmica i enginyeria de la franja costanera (transport de sediments, morfodinàmica costanera, enginyeria costanera, gestió

Zones costaneres: dinàmica sedimentària Agustín Sánchez Arcilla, José A. Jiménez i Joan Pau Sierra

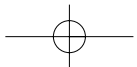
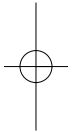
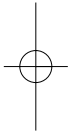
del sistema costaner, evolució costanera, efectes del clima sobre el sistema costaner). És autor de més de 40 articles en revistes científiques internacionals i estatals. L'any 2004 ha estat guardonat amb la distinció per a la promoció de la recerca universitària que atorga la Generalitat de Catalunya, en la categoria de Joves investigadors.

**Joan Pau Sierra Pedrico** és doctor Enginyer de Camins, Canals i Ports per la Universitat Politècnica de Catalunya. Catedràtic d'Escola Universitària del Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental (DEHMA) de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), on duu a terme la seva tasca docent i investigadora. Com a docent, imparteix diverses assignatures a l'Escola d'Enginyers de Camins, Canals i Ports, Enginyers Tècnics d'Obres Públiques i d'Enginyeria Geològica de la UPC, a diversos màsters i al Programa de doctorat interuniversitari en Ciències del Mar (UPC/UB/CSIC).

Com a investigador, treballa en l'àmbit marítim, desenvolupant tasques de recerca en hidrodinàmica, morfodinàmica i qualitat de les aigües costaneres.

Des de l'any 2003 és director del Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental de la UPC. Ha publicat prop de 20 articles en revistes estatals i internacionals, ha presentat uns 100 articles en congressos d'àmbit estatal i internacional i al voltant de 100 informes tècnics i de recerca. També ha dirigit 5 tesis doctorals, 2 projectes de màster i unes 30 tesines de fi de carrera. Ha participat en uns 20 projectes de recerca finançats per diversos organismes estatals i internacionals, entre ells 5 europeus (projectes FANS, COAST3D, PIONEER, DELOS i ECOSUD).

Síntesi	613
B11.1. La zona costanera	615
B11.2. Factors impulsors	616
B11.2.1. El clima de descàrregues fluvials	617
B11.2.2. El clima d'onatge	620
B11.2.3. El clima de nivells	621
B11.3. La resposta sedimentària	622
B11.4. Les zones deltaïques	624
B11.5. Les zones estuàries	627
B11.6. Els impactes del canvi climàtic	628
B11.7. Vulnerabilitat i risc	632
B11.8. Les estratègies de resposta	634
B11.9. La planificació costanera	635
B11.10. Les campanyes d'observació	636
B11.11. Conclusions	637
Agraïments	638
Referències bibliogràfiques	639



## Síntesi

Un tret que caracteritza la climatologia és la seva variabilitat, per la qual la zona costanera ja està preparada. En aquest sentit el veritable impacte del canvi climàtic sobre la costa és la seva acceleració o el possible llindar que es pugui ultrapassar. Més concretament, els valors regionals de la variabilitat climàtica i la seva evolució envers la «referència» terrestre són els dos factors determinants d'aquest l'impacte. A tall d'exemple, la importància de la pujada del nivell mitjà del mar és el seu valor relatiu, és a dir, en referència al nivell de terra, amb la qual cosa i atès que les zones deltaïques catalanes estan experimentant un enfonsament (subsidiència) d'1 a 5 mil·límetres per any, es pot preveure que aquestes àrees experimentin un ascens relatiu del nivell mitjà del mar d'aquesta mateixa magnitud.

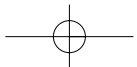
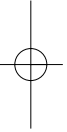
Els principals factors climàtics que modelaran l'impacte a la zona costanera (i que semblen començar a presentar símptomes d'aquest canvi en la climatologia) seran:

- a) El nivell mitjà relatiu del mar.
- b) La intensitat i la persistència de les borrasques (tempestes d'onatge).

Les conseqüències d'aquest potencial canvi seran un augment en la freqüència de les inundacions i una disminució del volum sedimentari (sobretot de sorra) disponible per a la zona costanera. Això es traduirà en un increment de l'erosió i en un augment de la probabilitat de desaparició dels ecosistemes costaners, a causa de la manca d'espai per a la seva migració i dinamisme natural.

En conseqüència, les zones més vulnerables seran els deltes i zones baixes associades de les gorges dels rius. Dins d'aquesta categoria s'inclouen, per tant, els deltes de l'Ebre, del Llobregat i de la Tordera, així com tota la resta d'aiguamolls costaners. L'augment relatiu del nivell mitjà del mar, la disminució progressiva d'aportacions sedimentàries i la major persistència de les borrasques implicaran una pèrdua de territori i d'ecosistemes costaners, a no ser que s'actui de manera urgent.

Aquesta actuació ha de començar amb prou antelació per poder anticipar-se al possible canvi climàtic, ja que no serà factible defensar totes les costes baixes de Catalunya simultàniament i en un període de temps tan curt.



**B11.1. La zona costanera**

La característica principal de la zona costanera és el seu dinamisme, amb termes «impulsors» i «respostes» actuant a una multiplicitat d'escalles de temps i espai (Sánchez-Arcilla i Jiménez, 1997). Aquesta dinàmica, juntament amb l'excés de pressió d'ús respecte dels recursos disponibles, expliquen el fràgil equilibri d'aquesta zona. Això la fa altament vulnerable a qualsevol tipus de canvi en els factors «controladors» i, especialment, a un possible canvi climàtic.

Tot i que hi ha un acord general sobre la possibilitat que es produeixi un canvi climàtic –almenys per a un nombre limitat de variables (com la temperatura global del planeta) i per a una escala d'unes quantes dècades (Lindzen, 1994)– hi ha discrepàncies sobre el canvi a escala regional. En particular, no hi ha consens sobre la velocitat a la que el nivell mitjà del mar (SLR) està augmentant (Barnett, 1990) i sobre com es podria accelerar aquest procés com a conseqüència d'un canvi climàtic. Aquest punt pot il·lustrar-se pel rang d'estimacions de SLR (vegi's per exemple Warrick, 1993), que van des de l'estimació d'1 metre l'any 2100 (Thomas, 1986) fins als 0,46 metres proposats recentment (Wigley i Raper, 1993), o la proposta de 0,66 metres feta per l'IPCC l'any 1990 (Warrick i Oerlemans, 1990). La mateixa incertesa s'aplica al grau d'intensitat de les tempestes d'onatge que afecten i modelen la franja costanera.

Anàlogament, també es pot esperar que els fluxos d'aigua dolça i sediments aportats pels rius i rieres de la costa catalana canviïn com a resultat d'un canvi climàtic al Mediterrani Nordoccidental. Aquesta variació afectarà també les característiques físicoquímiques i ecològiques de la costa (Broadus et al., 1986; Day i Templet, 1989).

Aquest capítol analitza l'efecte de la variabilitat i del possible canvi climàtic en termes dels fluxos d'aigua i sediments que tenen lloc a la zona costanera i que són els responsables de «controlar» el substracte geològic en aquest àrea. Per avaluar l'impacte de qualsevol tipus de canvi, incloent-hi un possible canvi climàtic, és necessari definir l'estat inicial o de referència respecte el qual s'estimarà l'impacte. Pel dinamisme de la zona costanera esmentat anteriorment, la definició d'aquest estat de referència no és una tasca fàcil, ja que s'ha de caracteritzar en termes dinàmics i amb variables que integrin els diferents components del sistema costaner.

Aquests components del sistema costaner –principalment el geomorfològic, l'ecològic i el socioeconòmic– permeten classificar les diverses tipologies de costa i, a partir d'aquí, els tipus d'impactes associats a un possible canvi climàtic.

En aquest capítol, i d'acord amb el que s'ha indicat abans, només es tracta la resposta geomorfològica associada als fluxos d'aigua i sediments.

Tot i això, també es consideren les interaccions amb les altres components i, de forma especial, amb les infraestructures costaneres existents.

### **B11.2. Factors impulsors**

Els efectes d'un possible canvi climàtic sobre l'evolució de la costa es realitzaran o verificaran a través del canvi en els agents que controlen l'evolució d'aquesta zona. Aquests termes impulsors són, per tant, el primer element que ha de ser analitzat a l'hora de valorar l'impacte d'un possible canvi climàtic. L'objectiu és caracteritzar aquests termes sota les condicions presents i les condicions «modificades» segons l'escenari de canvi en les condicions climàtiques.

A l'hora de desenvolupar una metodologia, l'objectiu general és estimar l'impacte del canvi climàtic en l'estat del medi costaner, per la qual cosa l'anàlisi haurà de realitzar-se d'una manera dinàmica, que lligui les diferents escales presents, tant en els factors impulsors com en la resposta costanera. Les principals escales d'interès per a la presa de decisions en aquesta zona són a llarg termini (dècades), a termini mitjà (anys) i l'escala episòdica (dies, però amb un període de retorn de dècades) (Sánchez-Arcilla i Jiménez, 1997). Això implica que cada terme impulsor ha de ser analitzat segons l'escala considerada, fet que a la pràctica suposa un filtratge, una agregació o una reducció de les dades, sense que això suposi una pèrdua d'informació rellevant per a cada escala (vegi's, per exemple, de Vriend et al., 1994).

Els principals factors impulsors poden començar-se a analitzar a partir del treball clàssic de Wright i Coleman (1973), Coleman i Wright (1973), i Galloway (1975) sobre deltes, una de les zones més vulnerables al possible canvi climàtic. El model de deposició deltaic i, per tant, la morfologia resultant, es considera com el producte de la interacció entre tres tipus principals d'agents: els rius, l'onatge i les mareas. La figura B11.1 mostra aquesta classificació ternària i inclou alguns exemples de deltes representatius (indicant la importància relativa de cada tipus

d'agent en els principals deltes del Mediterrani: l'Ebre, el Roine i el Po).

Aquesta classificació ternària ha de complementar-se amb alguns factors secundaris, com el vent i la circulació o camps de corrent general. Ambdós modulen el possible estat d'un sector de costa determinat. Els factors impulsors clau des del punt de vista del possible canvi climàtic són el nivell mitjà del mar, les tempestes d'onatge i la descàrrega sòlida dels rius i rieres en aquest tram de costa.

De la mateixa manera, és important considerar que l'estat del tram de costa reflecteix la dinàmica d'aquests factors impulsors en èpoques passades, mentre que la seva evolució reflectirà l'evolució d'aquests factors en el futur immediat. Ambdós poden ser raonablement diferents, com passa amb la descàrrega sòlida en els nostres rius a causa de l'existència de preses i l'alt grau de regulació fluvial practicada (vegeu, per exemple, Varela et al., 1986). Per aquest motiu, els deltes i, en general, les costes catalanes, han passat a estar dominades, en la seva pràctica totalitat, pel clima d'onatge (vegeu, per exemple, Jiménez i Sánchez-Arcilla, 1993), fet que ha suposat un desplaçament del punt característic del delta de l'Ebre, tal com mostra la figura B11.1.

Com a resultat de l'elevat grau d'antropització que presenta la costa catalana, a l'hora d'avaluar els possibles efectes d'un canvi climàtic és necessari distingir clarament entre els fluxos d'aigua i els de sediments. Tot i que en èpoques passades el flux d'aigua es correlacionava bé amb el flux sòlid, actualment ambdues variables presenten una correlació molt més feble a causa de les polítiques de lluita contra l'erosió i l'existència d'embassaments i obres a la costa, així com la carència generalitzada i progressiva de material sedimentari.

Així mateix, en aquesta classificació ternària la variable «marea» ha de ser substituïda per la variable «nivell mitjà del mar», ja que aquesta darrera variable no només incorpora la marea as-



tronòmica, sinó també la meteorològica i, fins i tot, el nivell relatiu terra/mar. Tots aquests processos actuen a diferents escales, però tots es refereixen a la diferència de nivell relatiu entre la terra emergida i el mar.

L'apartat següent analitza cadascun dels principals factors impulsors i la manera de valorar l'efecte d'un possible canvi climàtic sobre aquests factors i la corresponent resposta costanera.

### B11.2.1. El clima de descàrregues fluvials

La descàrrega líquida i sòlida dels rius i les rieres de Catalunya controla la productivitat biològica i la qualitat de l'aigua als trams de costa situats a prop de la seva desembocadura, així com la disponibilitat i el tipus de volum sedimentari no consolidat. Les aportacions sòlides terrestres són la font principal per a l'acreció vertical en les planes deltaïques i per al subministrament de material més gruixut (i dinàmica horitzontal i vertical associades) a la franja costanera. A causa de la inexistència d'una relació directa entre la descàrrega líquida i sòlida dels rius en les condicions actuals (particularment pel que fa referència a la fracció tipus sorra) —que, tal com s'ha comentat abans, es deu a la situació de regulació fluvial— ambdues descàrregues es tractaran per separat. En aquest context és important senyalar que l'efecte del canvi climàtic pot quedar esmorteït o totalment anul·lat per la política de gestió de l'aigua i d'explotació de la conca dels rius.

L'anàlisi està basada en unes sèries temporals que són suficientment llargues com per permetre estimar la contribució que els rius i les rieres que desemboquen a la costa catalana han fet en el passat (segons l'escala de temps considerada). Com que el transport sedimentari depèn de forma altament no lineal de la descàrrega líquida, és important no perdre la informació d'aquesta darrera variable en un procés d'avitjanament. Per aquest motiu, és millor utilitzar velocitats mitjanes diàries de descàrrega que no pas mitjanes mensuals o estacionals. En efecte, pot haver-hi mitjanes mensuals per sota del llindar de

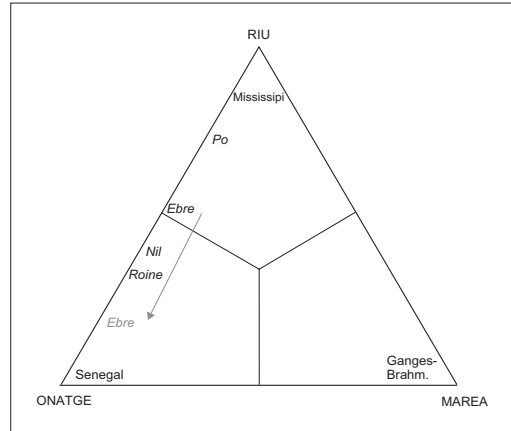


Figura B11.1. Classificació ternària dels deltes en funció dels processos dinàmics dominants.

Font: elaboració pròpia a partir de Jiménez et al., 1997.

transport per a una fracció sedimentària determinada i, tanmateix, el valor diari pot excedir-lo. Així mateix, l'impacte d'un possible canvi climàtic pot passar desapercebut dins del procés d'avitjanament, però ser ben aparent amb valors més instantanis.

A llarg termini (és a dir, en unes quantes dècades), la descàrrega pot estimar-se a partir dels corresponents registres. La figura B11.2 mostra l'evolució temporal de la descàrrega del riu Ebre, principal riu de Catalunya, en termes de cabal mitjà anual (escala esquerra) i en termes de cabal màxim anual (escala dreta).

Com pot observar-se a la figura, la distribució d'ambdues variables és diferent, fet que té clares implicacions pel que fa al transport sedimentari, tal com s'ha raonat al paràgraf anterior. A més, a l'hora de comparar el possible efecte d'un canvi climàtic, cal partir d'una situació inicial que tingui en compte la regulació de les conques. En el cas concret del riu Ebre, per calcular la distribució probabilística de les descàrregues líquides (figura B11.3) s'ha de restringir l'anàlisi al període que va des de l'any 1957 en endavant, és a dir, a partir de l'entrada en funcionament dels embassaments de Ribarroja i de Mequinensa.

Zones costaneres: dinàmica sedimentària Agustín Sánchez Arcilla, José A. Jiménez i Joan Pau Sierra

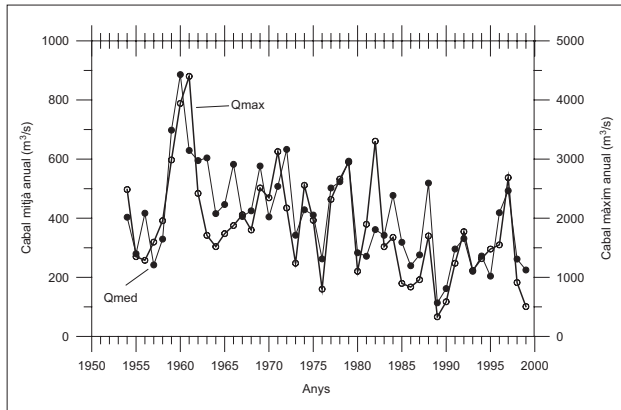


Figura B11.2: Evolució temporal de la descàrrega líquida al riu Ebre (Qmed) mitjana anual i (Qmax) màxim anual.

Font: elaboració pròpia.

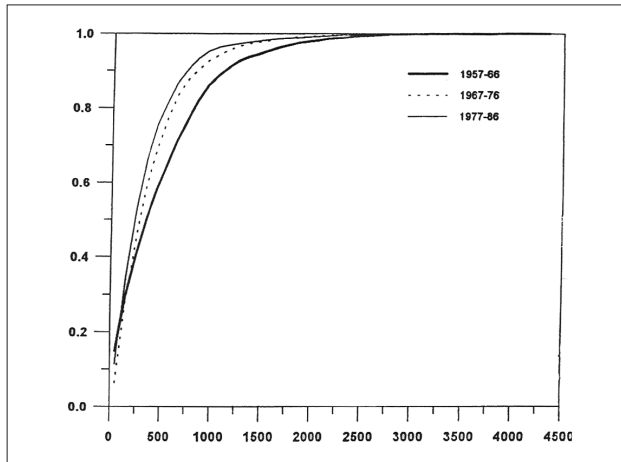


Figura B11.3: Distribució probabilística de les descàrregues al riu Ebre, utilitzant les dades registrades entre els anys 1957 i 1987. L'eix vertical mostra les freqüències acumulades i l'eix horitzontal la descàrrega (en  $m^3/segon$ ).

Font: elaboració pròpia.

A aquesta escala temporal (de dècades), l'estimació de qualsevol variació en la descàrrega líquida fluvial pot realitzar-se mitjançant una anàlisi de tendències (Mitosek, 1995), utilitzant les descàrregues mitjanes mensuals i anuals (per a més detall, vegeu Jiménez i Sánchez-Arcilla, 1997). L'anàlisi de tendència es realitza, llavors, amb tests no paramètrics (IPCC, 1992) o, d'una manera simplificada, mitjançant una anàlisi de regressió per mínims quadrats. Aquesta anàlisi pot

aplicar-se als valors mitjans anuals o mensuals per tal de poder estudiar qualsevol canvi o modificació en l'estacionalitat del riu. També pot aplicar-se aquest tipus d'anàlisi per als màxims anuals que, com pot apreciar-se a la figura B11.2 o a la distribució probabilística adjunta (figura B11.3), mostra una variabilitat més petita que en termes amitjanats.

Qualsevol canvi observat en la tendència decadal ha d'analitzar-se amb molta cura, ja que el seu origen pot ser múltiple: canvis en la climatologia i, per tant, en la pluviometria i escorrentia superficial de la conca, canvis en la política de regulació fluvial, en la gestió del sòl en la pròpia conca, etc. Per aquest motiu, en els rius altament regulats (com són la pràctica majoria dels existents a la costa catalana) és previsible que l'impacte del canvi climàtic sigui lleu o, fins i tot, inexistent en aquesta escala decadal.

L'estudi de les tendències a mitjà termini requereix una sèrie temporal menys llarga. Tanmateix, cal esperar que la majoria dels rius de Catalunya mostri un comportament descendent, com el que s'ha indicat anteriorment respecte del riu Ebre, el qual al llarg dels anys observats ha experimentat una disminució de la seva descàrrega.

Això dificulta la selecció de la descàrrega anual mitjana, fins i tot en el cas que es decideixi escollir aquesta variable com a control.

En qualsevol cas, l'estimació de la descàrrega líquida del riu, així com de la descàrrega sòlida associada, ha de realitzar-se considerant sempre un determinat grau de probabilitat, que reflecteix la incertesa d'aquesta mesura. A tall d'exemple, la figura B11.4 mostra les variacions de la descàrrega líquida del riu Ebre per a determinats

interval·ls de probabilitat (Jiménez i Sánchez-Arcilla, 1997).

A més de les escales a un termini llarg i mitjà que han d'emmarcar l'anàlisi d'aquesta variable, la principal contribució del riu al volum i a les característiques sedimentàries de la costa està associada a successos episòdics, que són els més eficients a l'hora de mobilitzar una descàrrega sòlida. És en aquests mateixos successos on cal esperar un efecte més important del possible canvi climàtic a escala local. La seva quantificació és difícil, ja que fins i tot els successos episòdics en la situació actual han de ser estimats a partir de la distribució extrema de la descàrrega del riu, amb les corresponents incerteses.

La distribució extrema pel que fa a la descàrrega del riu Ebre, en base als màxims anuals registrats des de 1957 i utilitzant una distribució tipus Gumbel, es mostra a la figura B11.5. A partir d'aquí qualsevol augment o disminució en aquesta descàrrega suposaria un augment o disminució en la corresponent descàrrega sòlida i una notable variació en els períodes de retorn associats. Això significa un comportament radicalment diferent de les aportacions sòlides a la costa que, encara que inicialment només tingui implicacions locals a escala de desembocadura i, eventualment, de tot el cos deltaic, progressivament afectaran tota la costa considerada.

La descàrrega sòlida que afecta més directament la dinàmica de la franja costanera és aquella que es refereix a la fracció sorra o superiors. El material més fi no resulta estable a la franja costanera directament exposada a l'acció de l'onatge. No obstant això, pot contribuir a la dinàmica vertical de zones costaneres baixes i a les costes interiors de badies protegides. Per aquest motiu, és la descàrrega de la fracció més gruixuda (que té lloc com a transport fluvial a les proximitats del fons) la que afectarà directament la part més externa de la costa.

L'avaluació d'aquest transport proper al fons presenta moltes dificultats (Jiménez i Sánchez-

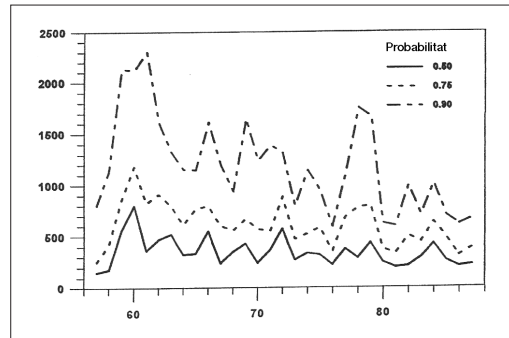


Figura B11.4. Variacions en les descàrregues del riu Ebre per a una probabilitat determinada. L'eix vertical indica descàrrega (m³/s) i l'eix horitzontal temps (en anys).

Font: elaboració pròpia.

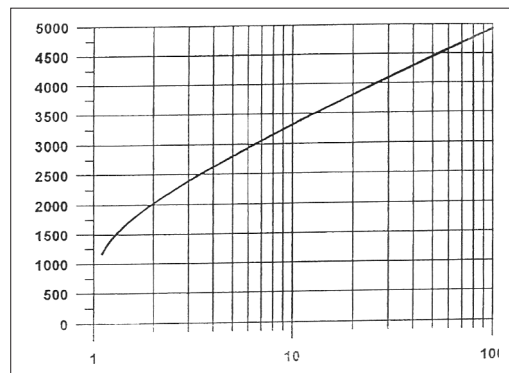


Figura B11.5. Règim extrem per a les descàrregues del riu Ebre en el període considerat. L'eix vertical indica descàrrega (m³/s) i l'eix horitzontal temps (en anys).

Font: elaboració pròpia.

Arcilla, 1997) i la seva quantificació mitjançant mesures directes és molt limitada i presenta graus d'incertesa molt grans (van Rijn, 1993). El nombre de fórmules disponibles és també molt elevat, i la seva fiabilitat, limitada (Nakato, 1990; van Rijn, 1993). En qualsevol cas, la utilització d'aquestes fórmules per calcular el transport sòlid fluvial tant sols proporciona un «transport potencial», que correspon a la capacitat de transport teòrica que té un riu o riera en condicions ideals. Tanmateix, les condicions presents, i sobretot les futures, dependran de la disponibilitat de sediment per ser transportat i d'altres factors limitants que no es consideren en

les fórmules. Aquestes darreres inclouen, per aquest motiu, paràmetres de calibració, els valors dels quals normalment són desconeguts pel que fa als rius de la costa catalana. Per tant, les càrregues sedimentàries estimades han de ser considerades en termes d'ordre de magnitud.

A partir de l'experiència del riu Ebre (Jiménez et al., 1990; Guillén et al., 1992), per tal d'estimar la contribució dels nostres rius s'aconsella utilitzar una formulació proposada per van Rijn (1984a,b), que permet calcular separatament les càrregues per fons i suspensió. Queda oberta, però, la contribució de la càrrega en suspensió a l'evolució costanera i l'aplicabilitat d'aquesta fórmula a un escenari climàtic que sigui diferent de l'actual. El procediment recomanat per analitzar el possible impacte climàtic a escala local consisteix en calcular la descàrrega sòlida en termes de la descàrrega fluvial líquida mitjana diària (Jiménez i Sánchez-Arcilla, 1997). Utilitzant, essencialment, les fórmules proposades per Van Rijn l'any 1984, complementades amb la fórmula d'Ackers i White (1973), es pot obtenir una sèrie temporal de les descàrregues per transport de fons. A partir d'aquí es poden calcular les probabilitats de cada nivell de descàrrega i, d'aquesta manera, estimar la fracció d'aquest transport que s'incorporarà a la dinàmica costanera en funció de la geometria del medi marí receptor i la seva climatologia.

#### B11.2.2. El clima d'onatge

L'onatge és el principal factor modelador de la costa catalana, a totes les escales considerades. Aquest fenomen, però, té el seu origen en diversos factors, entre els quals destaquen les mareas astronòmiques, que posseeixen una intensitat limitada (marees vives amb un rang de l'ordre de 0,25 metres). El coneixement del clima d'onatge s'obté a partir de registres, observacions visuals i dades obtingudes numèricament. És important incloure a la informació d'onatge considerada la seva direcció, ja que el corrent longitudinal generat i el transport corresponent depenen d'aquest angle.

Un dels components del clima d'onatge més importants a llarg termini és el transport que es produeix a la frontera entre la plataforma continental i la zona activa costanera (Wright, 1987). La importància de l'alimentació continuada de sediments a través d'aquesta frontera amb la plataforma continental ha estat estimada en un percentatge d'entre 15% i 69% per a platges californianes (Lee i Osborne, 1995). A la costa mediterrània aquest transport ha suplert, en part, la falta d'aportació sòlida dels rius i rieres del territori català (Jiménez et al. 1997, 1999). Això permet explicar el manteniment de la frontera terramar, que d'altra manera estaria en un procés de retrocés més acusat.

Atès que el transport és molt sensible a l'alçada de les ones (sobretot el transport transversal, que varia amb l'alçada d'ona elevada a una potència entre 2 i 5) cal una bona distribució probabilística d'aquesta variable. Altrament, els errors en el clima d'onatge es multiplicaran de manera incontrolada en les corresponents estimes del transport.

A partir d'una anàlisi probabilística del transport a través de la plataforma continental al llarg de diverses dècades, s'ha arribat a la conclusió que una parametrització amb una alçada d'ona significativament (Hs) de 3,5 metres i un període mitjà (Tz) de 6,2 segons pot donar un valor raonable per a una probabilitat d'ocurrència mitjana de 37 dies per any (Jiménez i Sánchez-Arcilla, 1997). A aquest valor mitjà s'ha de superposar la possible variació atribuïble al canvi climàtic a escala local. Per aquest motiu s'ha realitzat una anàlisi de tendències en termes de la mitjana anual de l'alçada d'ona significativament, utilitzant la metodologia proposada per Carter i Draper (1988). La figura B11.6 mostra l'evolució temporal entre els anys 1984 i 1992. L'anàlisi corresponent per a la direcció i el període de l'onatge segueix la metodologia presentada a les referències anterior i a Hozemans (1990).

El clima d'onatge a un termini mitjà (és a dir, en un període de pocs anys) s'ha d'esquematitzar te-

nint en compte que el transport longitudinal net és el principal factor responsable a aquesta escala temporal. Per això, les ones han de classificar-se amb el prou grau de detall, tant en termes d'angle com d'alçada o energia, per permetre una caracterització adequada del transport. Així doncs, és recomanable utilitzar una alçada d'ona morfològicament «representativa», que correspon a l'alçada d'ona amitjanada per les freqüències d'ocurrència dels diversos tipus d'ona, utilitzant la variable alçada d'ona elevada a la potencia  $P$  que s'obté de la fórmula de transport longitudinal. En les anàlisis realitzades a la costa catalana es recomana utilitzar una fórmula del tipus CERC, amb un coeficient de proporcionalitat amb un exponent entre 2 i 2,5.

Pel que fa a successos episòdics, el clima d'onatge ha de considerar els errors associats a les cues de la distribució i ha de treballar sempre amb intervals, més que amb valors puntuals. A més, cal tenir en compte que a la costa catalana els successos episòdics associats a un transport sedimentari més gran estan associats amb l'ocurrència simultània de tempestes d'onatge i de mareas meteorològiques. Per això cal caracteritzar l'ocurrència conjunta d'ambdues variables (de Valk, 1994).

La distribució probabilística conjunta de l'alçada d'ona significant, el tipus de tempesta i la màxima marea meteorològica associada a aquesta tempesta a la costa del delta de l'Ebre s'il·lustra a la figura B11.7. L'asterisc que apareix a la figura indica les condicions que van produir el trencament de la barra del Trabucador i, per tant, van generar un canvi morfològic «impulsiu» l'any 1990. Aquests successos, amb un període de retorn baix i una durada curta (de l'ordre de dies), són els principals modeladors «impulsius» de la franja costanera catalana (Sánchez-Arcilla i Jiménez, 1994).

### B11.2.3. El clima de nivells

El terme *nivell mitjà del mar* fa referència a les oscil·lacions de període més llargues que les ones de període llarg presents a la costa catalana i que afecten la resposta morfològica del tram costa-

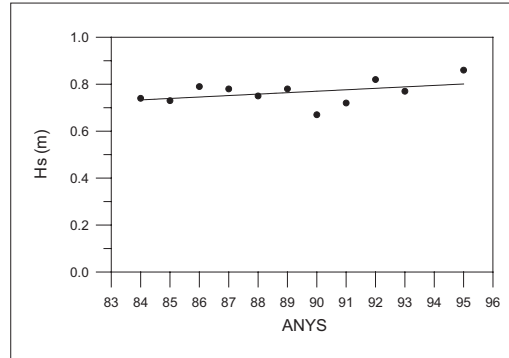


Figura B11.6. Evolució temporal de l'alçada d'ona significant ( $H_s$ ) al cap de Tortosa (boia situada a 50 metres de fondària davant del delta de l'Ebre).

Font: elaboració pròpia.

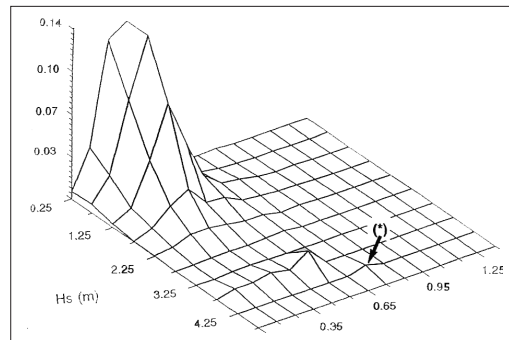


Figura B11.7. Distribució probabilística conjunta de l'alçada d'ona ( $H_s$ ) i nivell mitjà del mar ( $Z$ ). L'asterisc (\*) indica les condicions que van conduir al trencament de la barra del Trabucador, l'octubre de l'any 1990.

Font: elaboració pròpia.

ner. En aquesta categoria es poden diferenciar tres tipus d'oscil·lacions:

- 1) La component periòdica associada a la marea astronòmica.
- 2) La component aleatòria associada a la marea meteorològica.
- 3) Una component quasi «estacionària» associada a la variació relativa dels nivells terra-mar.

La component astronòmica juga un paper no menyspreable en costes meso i macromareals.

Tot i això, a la costa catalana el seu efecte és molt limitat si es compara amb la marea meteorològica que, a causa de l'efecte combinat de la pressió atmosfèrica (efecte baròmetre invertit) i la tensió tangencial del vent, és capaç de produir sobre-elevacions de més d'un metre d'alçada.

Aquestes sobre-elevacions, per a un període de retorn de 10 anys son de l'ordre d'un metre, però per a un període de retorn de 100 anys poden apropar-se al metre i mig. Qualsevol ascens del nivell relatiu del mar respecte el substrat terrestre incrementarà notablement aquestes sobre-elevacions, o el que és el mateix, en disminuirà el període de retorn. Com exemple, per a la distribució probabilística de mareas meteorològiques calculades a la zona costanera del delta de l'Ebre, la sobre-elevació amb 100 anys de període de retorn disminuirà a un període de retorn de 9 anys amb un ascens relatiu del nivell mitjà del mar de 0,46 metres. El mateix període de retorn de 100 anys amb la mateixa sobre-elevació del nivell mitjà del mar disminuirà a 60 anys per al cas del delta del Rin (Delft Hydraulics, 1993). Aquest fet emfatitza que la vulnerabilitat de les nostres costes, per la seva limitada carrera de marea i energia d'onatge, es ben superior a la de les costes de països més «exposats».

El tercer component es refereix al nivell relatiu terra-mar, ja que és aquest nivell el que contribueix a modelar la línia/franja costanera. Aquest nivell resulta de la superposició de la variació eustàtica del nivell mitjà del mar i els desplaçaments locals (verticals) del substrat. A les zones deltaïques l'enfonsament local excedeix normalment la component eustàtica (Stanley, 1988; Suhayda, 1987). Les dades necessàries per calcular la tendència a llarg termini del nivell relatiu terra-mar provenen normalment de mareògrafs (Emery et al., 1991; Pirazzoli, 1991) que ja reflecteixen la composició del nivell eustàtic i el canvi local en el lloc on el mareògraf està ubicat. Per aquest motiu l'extrapolació de valors a costes «properes» ha de realitzar-se amb precaució. Com a il·lustració, i a partir de les dades dispo-

nibles de mareògrafs en el delta del Roine (Suañez, 1995) i a la ciutat de Marsella, en un zona tectònicament més estable (Morhange, 1994), s'aprecien diferències de 1,1 mm per any a la zona de Marsella, de 2,1 mm per any a la zona de la Camarga dins del delta del Roine (el darrer segle). Aquestes diferències poden utilitzar-se per estimar un valor de la subsidència que en el cas del delta del Roine resulta ser de l'ordre d'1 mm per any. A la nostra costa no existeixen registres mareals suficientment llargs per a obtenir una estimació comparable. Per aquest motiu cal realitzar estimes indirectes o inverses a la taxa de canvi relatiu de nivells terra-mar. Utilitzant les taxes d'evolució costanera i el balanç sedimentari per a un període de temps suficientment llarg l'estimació obtinguda per a la zona costanera del delta de l'Ebre va ser un ascens relatiu del mar de 2 a 5 mm per any (Sánchez-Arcilla et al., 1993).

### B11.3. La resposta sedimentària

La resposta costanera sedimentària a la climatologia present i el seu possible canvi en el futur ha de realitzar-se combinant les diverses escales espacials i temporals presents en els processos morfodinàmics. La definició d'aquestes escales ha de començar a partir del coneixement disponible dels factors impulsors descrits a la secció anterior i de la resposta costanera observada. El principal problema radica en què un agent (per exemple l'onatge) actua a diferents escales de maneres també ben diverses. A l'escala principal del procés considerat, l'agent actuarà com a *controlador*, mentre que en altres escales jugarà el paper de *soroll* o de condició de contorn (de Vriend, 1991). Un exemple d'això que s'acaba de descriure es pot visualitzar quan es considera el transport longitudinal de sediments induït per l'onatge a la costa del delta de l'Ebre (figura B11.8).

L'escala temporal natural del transport longitudinal és mitjana, és a dir, uns quants anys. Si aquesta escala coincideix amb la de l'estudi el transport longitudinal serà el principal compo-

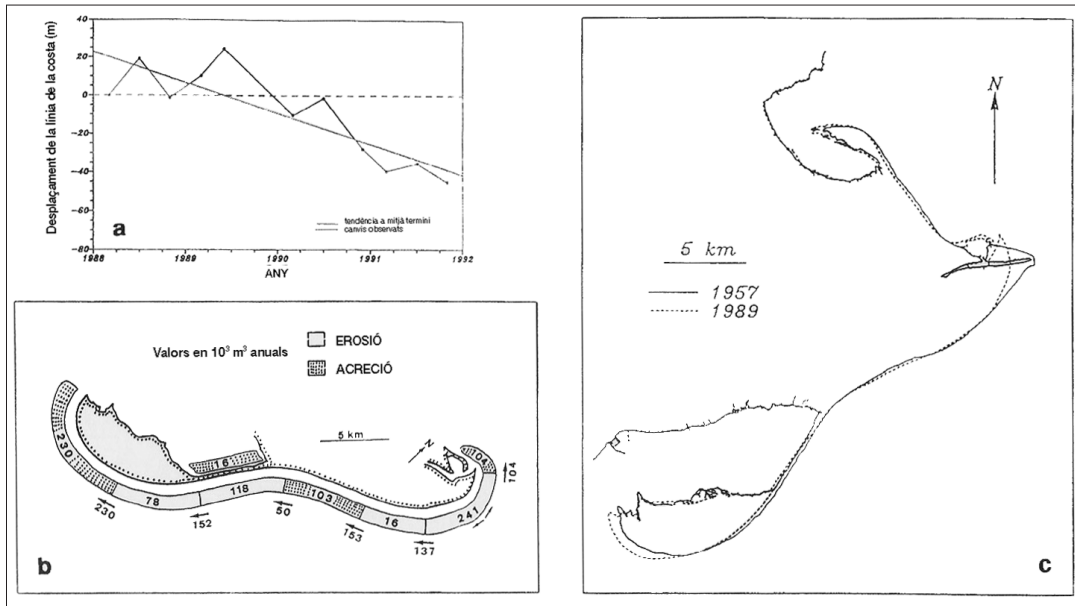


Figura B11.8. Rol del transport de sediments al llarg de la costa segons les diferents escales de temps: (a) termini curt, (b) termini mitjà i (c) termini llarg. Font: adaptada de Jiménez i Sánchez-Arcilla, 1993.

ment d'aquest. El seu paper queda il·lustrat a la figura B11.8, que mostra com les taxes de transport net anual permeten explicar el balanç sedimentari corresponent. Això significa també que els canvis volumètrics a llarg termini estaran controlats principalment pel patró de transport longitudinal net.

Quan l'escala de l'estudi és més petita que la del procés, aquest actuarà com una condició de contorn, tal com indica la figura B11.8a, on els moviments del perfil costaner de la costa del delta de l'Ebre apareixen dibuixats en contrast amb la tendència a mitjà termini. Poden observar-se les oscil·lacions estacionals clàssiques en el comportament transversal de la franja costanera. La tendència mitjana que es mostra en aquesta mateixa figura està associada al gradient positiu en el transport longitudinal net, que indueix un comportament erosiu i representa, per tant, una condició de contorn externa. Finalment, quan l'escala de l'estudi és més gran que la del procés considerat, aquest tindrà un efecte residual o de soroll.

Tal com il·lustra la figura B11.8c, l'evolució a llarg termini de la costa del delta de l'Ebre mostra un remodelament que pot definir-se en termes del corresponent balanç sedimentari. El transport longitudinal de sediments no pot considerar-se responsable d'aquest balanç, ja que el sistema està quasi «tancat», almenys pel que fa a la fracció sorra (Jiménez et al., 1993). Tanmateix, la remodelació observada es pot atribuir al transport longitudinal net, motiu pel qual aquest procés, a llarg termini, tindrà un efecte residual com a remodelador, però no contribuirà al balanç a aquesta escala.

La resposta costanera és funció de la climatologia, la geomorfologia i les estructures existents en cada tram de costa, i posseeix una multiplicitat d'escala. A l'hora d'analitzar la resposta costanera a un possible canvi climàtic a escala local es consideren normalment tres escales temporals:

1) **Escala temporal llarga:** és la que està relacionada més directament amb els canvis d'abast

global (en planta, perfil i balanç sedimentari) i està controlada pels factors següents: l'input sedimentari dels rius, els canvis relatius que es produeixen en el sistema terra-mar, el transport de sediments en el límit intern de la plataforma continental, intercanvis sedimentaris entre la franja costanera i la zona terrestre adjacent (a causa, per exemple, del transport eòlic) i variacions a escala decadal dels factors climàtics. També es pot considerar com agent a aquesta escala l'efecte residual del transport longitudinal de sediments.

- 2) **Escala temporal mitjana:** està associada a canvis costaners sistemàtics de l'ordre de quilòmetres i amb una variabilitat temporal de l'ordre d'anys. La principal resposta costanera observable a aquesta escala és el remodelament de la costa i el principal factor controlador són els transports nets de sediments (longitudinal i transversal). Els canvis costaners resultants són el producte de la integració dels diferents trens d'onatge que actuen en un tram de costa determinat, tot i que la manera d'amitjanar-los dista d'estar universalment acceptada.
- 3) **Escala temporal episòdica:** està associada a l'acció de termes impulsors extrems, actuant durant pocs dies i amb un període de retorn de l'ordre de dècades. Aquest agents produeixen importants modificacions de tipus impulsiu a la zona costanera i, pel que fa a la costa mediterrània, se'n consideraran essencialment dos:
  - a) L'acció de tempestes, caracteritzades simultàniament per marees meteorològiques i onatge altament energètic (que resultarà en patrons d'erosió accentuats i eventuais trencaments de trams costaners més fràgils).
  - b) Riuades extremes que produiran un important subministrament sedimentari en un curt període de temps i, simultàniament, un remodelat intents de la zona propera a la gola dels rius.

Aquest successos impulsius es caracteritzen per una resposta costanera immediata, a partir de la qual el tram costaner afectat s'anirà recuperant posteriorment amb una escala temporal diferent i que entra dins del que s'ha qualificat de termini mitjà. El possible canvi climàtic a escala local afectarà sens dubte la distribució d'aquests extrems, motiu pel qual el seu estudi és especialment important per caracteritzar l'impacte del canvi climàtic a la costa catalana.

La resposta costanera observada depèn en cada cas de l'escala de temps seleccionada per a l'estudi. La vulnerabilitat dels diferents tipus de respostes costaneres al canvi climàtic depèn, com ja s'ha indicat, de la geomorfologia, la climatologia i les estructures existents. Les costes penya-segades seran, en aquest sentit, menys vulnerables i menys dinàmiques, mentre que les costes sedimentàries amb un volum granular limitat seran les més vulnerables. Les costes sedimentàries amb un volum «indefinit» de material, encara que susceptibles de grans canvis per l'impacte de la climatologia, posseiran una vulnerabilitat més limitada. Els dos tipus de costa que (per ser el resultat del balanç entre factors terrestres, marins i atmosfèrics) estan en un equilibri més fràgil i són més vulnerables al possible canvi climàtic local són els deltes i els estuaris, que seran tractats específicament en altres apartats d'aquest capítol.

#### **B11.4. Les zones deltaïques**

L'existència de un possible canvi climàtic afectarà, de manera combinada, un nombre determinat de variables climatològiques. En un sentit estricte, aquests canvis afectaran la dinàmica actual dels sistemes deltaïcs a través dels seus components o subsistemes físic, ecològic i socioeconòmic. Pel que es refereix al tema d'aquest capítol, que és l'efecte en el component físic, i més particularment el substrat, les variables climatològiques poden agrupar-se segons el procés deltaïc que impliquen. És per això que solen classificar-se en variables associades a processos de formació i de reducció (Sánchez-Arcilla i Jiménez, 1997).



Els processos de formació (taula B11.1) es refereixen als mecanismes que governen el creixement del cos deltaic i es relacionen essencialment amb l'aportació sòlida del riu. Els processos de reducció actuen sobre el conjunt de la franja costanera i estan associats al transport sedimentari i remodelament de la costa.

Les dues variables principals associades als processos de formació són la taxa de precipitació a la conca fluvial i el percentatge de desertificació. Les taxes de precipitació a la conca mediterrània han estat estimades utilitzant models de circulació general (GCM), considerant-hi diferents escenaris climàtics (Mitchell et al., 1990; Palutikof et al., 1992). En general s'estima un increment en la precipitació mitjana del 3% per grau (°C) a l'hivern i una disminució del 3% per grau (°C) a l'estiu. Tot això va associat normalment a un augment de la precipitació mitjana a la tardor i hivern i un descens a l'estiu i primavera per a la zona de la conca mediterrània on està situada Catalunya.

L'augment de la precipitació dins de la conca de drenatge hauria d'anar associat a un increment del transport sedimentari. Tot i això, la clau és la manera com aquest augment de precipitació succeeix. Efectivament, un augment constant (distribuït uniformement al llarg de l'any) de la taxa de precipitació anirà associat a un lleuger increment de la descàrrega sòlida. El mateix augment concentrat en un nombre limitat de successos episòdics incrementarà notablement el transport sòlid, que és una funció altament no lineal de la velocitat de l'aigua en el riu.

Pel que fa al percentatge de desertització a la conca de drenatge, és important considerar l'efecte de la climatologia, dels períodes de sequera i de les pràctiques agrícoles (Sestini et al., 1989; Palutikof, 1993). Un augment de la desertització va associat a un potencial d'erosió més elevat de la conca de drenatge i, per tant, a una descàrrega sòlida del riu també més gran. Aquesta situació s'aprecia en el riu Ebre després de la gran desfo-

Processos deltaics	Variable climatològica	Tendència en la variable / procés
Formació	Pluja	↑/↑
	Desertització	↑/↑
Reducció	Pujada del nivell del mar	↑/↑
	Tempestes	↑/↑
	Canvis de direcció	↑/?

Taula B11.1. Canvis en els processos deltaics produïts per la climatologia

Font: elaboració pròpia.

restació que hi va haver en la seva àrea de drenatge fa diversos segles.

L'efecte d'aquestes dues variables en el canvi «físic» del cos sedimentari deltaic és potencial. Això significa que només succeeix sota condicions naturals, mentre que, per a rius altament regulats, els processos de formació deltaics dependran críticament de la política de regulació fluvial que controla la descàrrega líquida-sòlida del riu. Per aquest motiu, els efectes d'un possible canvi climàtic se sentiran amb molta menys intensitat en el delta que el que succeiria en un altre tipus de curs fluvial.

Les variables climàtiques associades a processos reductius estan associades a la dinàmica costanera i als factors que controlen aquesta dinàmica. Les infraestructures del riu quasi no afectaran aquestes variables, i el seu control serà solament indirecte, a través del volum sedimentari disponible.

La primera variable a considerar en aquest grup és el nivell relatiu terra-mar, un dels factors de canvi climàtic més universalment acceptats tot i que la taxa precisa del qual encara ofereix grans dubtes a nivell local (Warrick i Oerlemans, 1990; Wigley i Raper, 1993). L'augment del nivell relatiu del mar produirà un retrocés de la línia de costa, encara que la magnitud d'aquesta erosió ofereix un cert rang de variabilitat i incertesa, segons com es calculi (SCOR, 1991). La taxa d'augment del nivell mitjà del mar «perce-

buda» pels deltes serà notablement superior a l'experimentada en altres trams de costa degut a la subsidència local en aquests cossos sedimentaris. Aquest augment del nivell mitjà del mar afectarà la franja costanera dels deltes mitjançant l'erosió abans mencionada, però també a la plana deltaica. En efecte, les planes deltaïques que experimentin una taxa d'acreció vertical inferior a l'ascens del nivell relatiu del mar, tendiran a la desaparició (Wolff et al., 1993). Addicionalment aquest augment del nivell relatiu del mar disminuirà el període de retorn dels successos impulsius d'inundació, fins i tot sense considerar cap canvi en la climatologia de tempestes de la zona. Com a il·lustració la figura B11.9 mostra com variarà el clima de marea meteorològica a la costa del delta de l'Ebre si es considera un augment del nivell relatiu del mar de 0,46 metres de cara a l'any 2100 (Wigley i Raper, 1993).

El resultat és que la inundació que actualment succeeix cada 75 anys pot arribar a tenir lloc, en termes mitjans, cada 7 anys. Aquesta disminució en el període de retorn correspon a una costa sense resposta dinàmica a l'ascens del nivell relatiu del mar. En efecte, per a costes que poden «seguir» l'ascens del nivell relatiu del mar, el nivell relatiu terra-mar es mantindrà constant i no hi haurà variació en el període de retorn. Tanmateix, els sistemes sedimentaris de la costa catalana amb una mobilitat i un volum sedimentari suficients per tal que l'onatge pugui remodelar la costa i fer-li seguir l'ascens del nivell relatiu del mar són molt rars. En tots els altres casos, és a dir, en aquells casos en què no s'acompleix una regla tipus *Brunn* (Brunn, 1962), la resposta costanera, tant a la franja com a la plana deltaica, serà més petita que l'ascens relatiu del nivell mitjà del mar i, per tant, els successos d'inundació seran més freqüents.

L'altre possible efecte del canvi climàtic a escala local es refereix a la intensitat de les tempestes marines. La major part dels estudis realitzats en aquest camp s'han concentrat en la freqüència i en la intensitat dels ciclons tropicals, a causa de

la manca de precisió i resolució dels models generals de circulació a les latituds de la conca mediterrània. Les anàlisis realitzades al mar del Nord (Carter i Draper, 1988; Hoozemans, 1990) mostren un augment de 0,034 metres per any en el clima d'onatge. Aquests resultats, tanmateix, s'han de tractar amb precaució ja que es refereixen a un període de 15 a 20 anys, per la qual cosa són poc concloents a l'hora de valorar un possible canvi climàtic.

En aquest sentit, cal destacar que és tan important un canvi en l'energia mitjana de l'onatge com un canvi en la desviació típica de la distribució d'aquesta variable (Katz i Brown, 1992). D'aquesta manera, un augment en la intensitat i la desviació típica (i, per tant, de les cues de la distribució) del clima de tempestes marines, augmentarà la magnitud de la resposta costanera observada. Això es deu, en primer lloc, als augmentos en les taxes de transport transversal i longitudinal i els seus corresponents gradients. En segon lloc –i més important–, també es deu a la disminució dels períodes de retorn entre successos erosius de tipus impulsiu. Això implica que els processos naturals de recuperació, un ordre de magnitud més lent que els processos d'erosió, no tindran el temps suficient per actuar, i això comportarà un augment de la tendència erosiva neta a llarg termini.

Igualment, és important considerar el canvi en la direccionalitat de l'onatge, factor determinant també en la resposta costanera observada. Els models de circulació general no permeten fer prediccions fiables a escala local i les anàlisis realitzades fins ara han utilitzat hipòtesis de tipus empíric (Hoozemans, 1990). El canvi induït per aquesta variació direccional en la resposta costanera depèn de la geomorfologia, del volum de sediment disponible i de la relació i la seqüència de tempestes que actuen. Per tot això, és difícil preveure quin serà el canvi esperat. Habitualment, s'assumeixen els escenaris més negatius possibles per estimar el màxim retrocés esperable de la línia de costa (vegeu, per exemple, Lyouisse i Kuik, 1990).

### B11.5. Les zones estuàries

La major part de les zones estuàries del país estan fortament modificades per la pressió antròpica. Les aigües són utilitzades per al reg i el subministrament urbà i industrial. Aquest augment de les necessitats d'aigua ha estat satisfet amb la construcció d'un nombre creixent d'embassaments i amb una adequació de la política de regulació fluvial. Tot això ha suposat una reducció notable de la descàrrega d'aigua, sediments i nutrients que arriben a la desembocadura.

Prenent com a exemple l'estuari més característic de la costa catalana, el del riu Ebre, la seva descàrrega s'ha reduït aproximadament en un 30% durant el segle xx, pels motius descrits anteriorment (Ibañez et al., 1996). Els 42 quilòmetres inferiors del curs del riu funcionen normalment com un estuari altament estratificat, amb una falca salina, la dinàmica de la qual depèn de la descàrrega fluvial i de la batimetria i climatologia de la zona. Així doncs, un canvi d'estació o en la climatologia local suposa un canvi en la seva extensió i en la seva dinàmica. Per exemple, durant el període 1960-1990 la descàrrega mitjana del riu era de 424 m<sup>3</sup>/s (mesurats a Tortosa a 42km de la desembocadura). En el període 1980-1990, la descàrrega anual mitjana es va reduir a 300m<sup>3</sup>/s (Ibañez, 1993). L'elevat grau d'estratificació de la columna d'aigua, amb una interfase o haloclina ben marcada, és típica d'estuaris amb una marea de tipus micromareal (Dyer, 1997). La dinàmica estuària, tant en les condicions climàtiques presents com en les futures, estarà controlada pels factors següents:

- 1) Fluvials
- 2) Atmosfèrics
- 3) Marins.

Entre els primers, l'essencial és la descàrrega líquida del riu. Entre els segons, els principals són

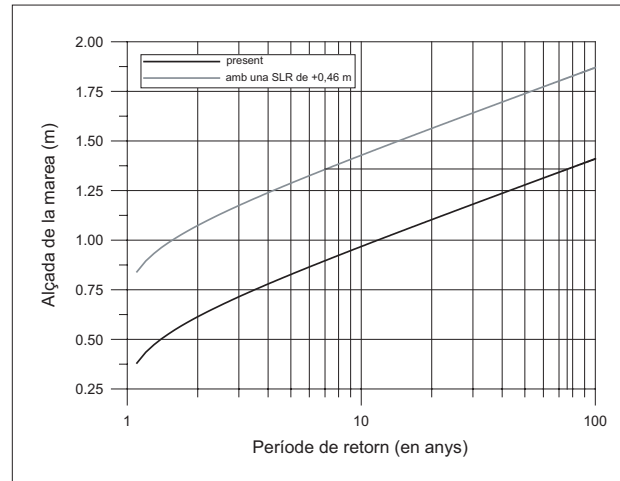


Figura B11.9. Clima de marea meteorològica al delta de l'Ebre, sota condicions actuals i sota una pujada mitjana del nivell del mar l'any 2100.

Font: elaboració pròpia.

el vent i la pressió atmosfèrica. Entre els tercers, els principals són l'onatge i el nivell mitjà del mar «receptor» (eventualment, també, dels corrents de la zona). Sota condicions climàtiques «normals», la falca salina oscil·la entre quatre posicions característiques controlades per la descàrrega fluvial i la topografia del fons (figura B11.10).

Pel que fa a la descàrrega líquida, abans que es modifiqui l'estructura estuària s'han d'excedir determinats llindars. Aquesta situació apareix resumida a la taula B11.2, que compara la posició de la falca salina amb la descàrrega fluvial. Com a resum pot dir-se que 400m<sup>3</sup>/s és el cabal crític que marca la diferència entre la presència o l'absència de la falca salina (Guillen, 1992; Ibañez, 1993; Sierra et al., 2002). En el cas del riu Ebre, la màxima penetració de la falca salina pot arribar a Amposta per a cabals entre 80 i 150m<sup>3</sup>/s i, eventualment, fins a Tortosa, a 42 km de la desembocadura (Aragon, 1943).

És important ressaltar l'efecte «memòria» de la zona estuària, mitjançant el qual la posició de la falca salina també es veu condicionada per la

Zones costaneres: dinàmica sedimentària Agustín Sánchez Arcilla, José A. Jiménez i Joan Pau Sierra

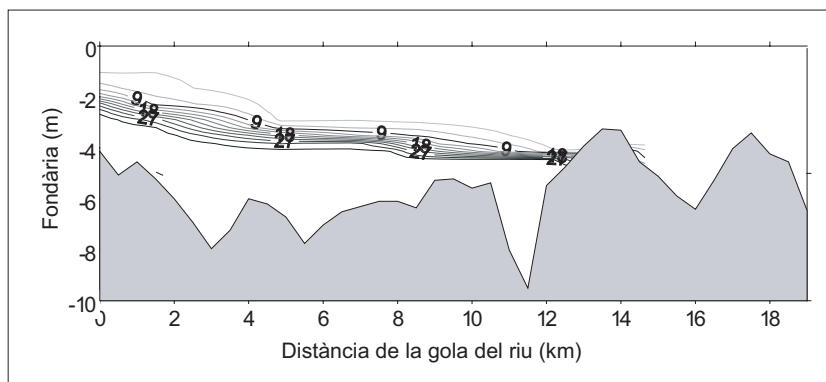


Figura B11.10. Distribució de salinitat a l'estuari de l'Ebre durant una campanya de la primavera de 1999.  
Font: elaboració pròpia.

Localització del límit de la falca salina	A	B	C
Sense falca	350-400 m <sup>3</sup> /s	>400 m <sup>3</sup> /s	Sense observacions
Migjorn (6 km)	250-350 m <sup>3</sup> /s	300-400 m <sup>3</sup> /s	>250 m <sup>3</sup> /s
Gracia (18 km)	150-250 m <sup>3</sup> /s	100-300 m <sup>3</sup> /s	>130-250 m <sup>3</sup> /s
Sapinya (21,5 km)	Sense observacions	80-100 m <sup>3</sup> /s	Sense observacions
Amposta (28,3 km)	<150 m <sup>3</sup> /s	<80 m <sup>3</sup> /s	<130 m <sup>3</sup> /s

Taula B11.2. Sumari dels valors de les descàrregues del riu (diàries) i localització del límit de la falca salina, segons diverses publicacions  
Font: Guillén, 1992 (A); Ibáñez, 1993 (B) i Sierra et al., 2002 (C).

climatologia marina, meteorològica i fluvial dels dies anteriors (Sierra et al., 2004). L'estratificació es manté raonablement constant, tant a la capa superior com a l'inferior de la columna d'aigua, amb un fort gradient a l'interfase o haloclina, amb un gruix d'entre 0,5 i 1 metres. Més a prop de la desembocadura, es produeixen situacions de major turbulència i barreja i, per tant, augmenta l'amplitud de la interfase. Aquest efecte memòria també està associat a la presència de barres a la llera de la zona baixa del riu, que solen coincidir amb posicions «freqüents» de la falca salina. El llindar de 400 a 410 m<sup>3</sup>/s estimat per a la presència de falca salina (Sierra et al., 2004) tindrà una importància clau en la determinació de la presència i persistència d'a-

questa falca (en diferents escenaris futurs de canvi climàtic o en la hipòtesi d'un potencial transvasament de cabal del riu).

#### B11.6. Els impactes del canvi climàtic

Un possible canvi climàtic a escala regional alterarà les variables climatològiques que afecten la dinàmica costanera d'un manera combinada. Considerant deltes i estuaris, aquest canvi en la climatologia afectarà el seu component físic, ecològic i socioeconòmic. En aquest capítol només es consideren els canvis en el substrat físic. Pel que fa als deltes, les variables afectades per la climatologia poden agrupar-se, com s'ha dit abans, en *variables de formació* i *variables de reducció*.

Considerant primer la formació deltaica i, particularment, la taxa de precipitació (Mitchell et al., 1990; Palutikof, 1993) s'han obtingut augments de la precipitació a la tardor i l'hivern i disminucions a la primavera i l'estiu. Tanmateix, la precisió d'aquestes estimes per a la conca de la Mediterrània és limitada. Més encara, l'increment en la taxa de precipitació, considerant l'actual política de control fluvial, no és probable que produeixi canvis significatius.

La desertització o la coberta vegetal van associades al potencial d'erosió ja que, a més desertització, més fàcil és produir erosió a la conca de drenatge del riu. L'aportació sedimentària a la boca del riu dependrà de la política de regulació fluvial i de l'existència d'embassaments que actuen com a barreres al transport de sediments riu avall. Com que actualment la majoria dels deltes significatius estan regulats, aquests efectes a la climatologia es notaran amb una intensitat limitada.

Les variables climatològiques que afecten els processos de reducció actuen, com s'ha dit abans, sobre tota la franja costanera i no estan afectades per la política de regulació fluvial (només poden ser mitigades o augmentades per aquesta política). L'efecte de l'augment relatiu del nivell mitjà del mar depèn del perfil i topografia de la zona costanera, ja que a partir de les seves característiques existiran uns riscos d'erosió i inundació. Aquestes condicions controlaran la disminució del període de retorn d'inundacions (de 75 a 7 anys en un escenari d'augment del nivell mitjà del mar de 0,46 metres l'any 2100), fet que contribuirà a canviar l'ecologia i, per tant, la resistència de la zona a inundacions i erosions posteriors.

El canvi induït per la climatologia en les tempestes de la zona no pot estimar-se amb precisió per a una zona limitada com el Mediterrani Occidental (Raper, 1993; Schlesinger, 1993). Per aquest motiu no poden extreure's conclusions definitives per a una zona d'amplitud tan limitada. Tanmateix, les anàlisis realitzades amb da-

des limitades (de 15 a 20 anys) al mar del Nord mostren un lleuger augment anual de l'ordre de centímetres en l'alçada d'ona i una lleugera variació en la seva direccionalitat. Ambdós fenòmens produiran canvis en les taxes de transport i de dinàmica costanera que, per ser difícils d'estimar a priori, han de ser calculats en termes d'escenaris.

El fet més important és, sens dubte, considerar que no és sols la variació en la mitjana sinó en la desviació típica de qualsevol d'aquestes variables climatològiques la que realment afectarà la climatologia local i la resposta de la zona costanera (Katz i Brown, 1992). Efectivament, qualsevol canvi en la desviació típica de la distribució, fins i tot sense canvi en la mitjana, produirà un augment en la probabilitat d'ocurrència de successos extrems i, per tant, canvis més significatius en la resposta costanera, en general, i en deltes i estuaris, en particular.

Pel que fa als estuaris, i tenint en compte les mateixes limitacions que s'han posat de manifest en el cas dels deltes, es pot analitzar la seva resposta en termes de dinàmica climatològica, però sempre considerant l'impacte de la regulació fluvial. Si es pren com exemple el riu Ebre i s'analitza la intrusió de la falca salina durant el segle xx (en el període anterior a la construcció dels embassaments), pot ser il·lustratiu avaluar la sèrie temporal amb descàrregues anuals màximes i mínimes. Si es considera la descàrrega de l'any 1919 i la descàrrega de l'any 1931 (la descàrrega segona més alta i segona més baixa del període 1913-1931), es pot observar un augment de la presència i persistència de la falca salina en funció de la descàrrega fluvial immediatament anterior i, per tant, de l'efecte memòria a la conca baixa del riu (Sierra et al., 2004). La primera part del segle xx no va mostrar intrusió de la falca salina durant més de mig any, mentre que en el període 1990-1999 la intrusió salina va tenir lloc durant més de 9 mesos i, finalment, l'any 1999 va haver-hi una presència de falca salina durant més del 95% del temps de l'any (taula B11.3).

Zones costaneres: dinàmica sedimentària Agustín Sánchez Arcilla, José A. Jiménez i Joan Pau Sierra

Campanya de camp	Data	Descàrrega mitjana (m <sup>3</sup> /s)
Pioneer I	03-04-99	183.90
	05-04-99	157.20
Pioneer II	07-07-99	119.80
	08-07-99	112.60
	12-07-99	129.40
Pioneer III	05-10-99	187.02
	06-10-99	241.87
Pioneer IV	03-02-00	302.82
	05-02-99	200.02

Taula B11.3. Sumari de dates i descàrregues del riu contemporànies a les mesures de salinitat al llarg del curs de l'estuari.

Font: elaboració pròpia.

Qualsevol canvi addicional en la climatologia o en les infraestructures amb un impacte comparable a la climatologia (com, per exemple, el projecte de transvasament de part del cabal líquid del riu proposat en el marc del derogat Pla Hidrològic Nacional) augmentaria la sensibilitat d'aquestes zones a qualsevol tipus d'impacte. En particular, una desviació del 15% del cabal anual a Tortosa, tal com s'havia planificant, hau-

ria produït una reducció dels pics (assumint que s'hagués mantingut en tot moment un cabal ecològic de 100m<sup>3</sup>/s i un augment lleuger en la salinitat) (figura B11.11). La mateixa situació hauria produït amb la salinitat a la capa inferior (figura B11.12).

Tanmateix, l'impacte sobre la dinàmica estuària depèn críticament de la manera com s'extregui aquest cabal del riu o en la manera com un canvi en la climatologia faci disminuir la descàrrega líquida del riu. Efectivament, és molt diferent extreure aquest cabal dels pics que extreure'l homogèniament al llarg de l'any. La descàrrega fluvial, amb la reducció considerada distribuïda proporcionalment al cabal del riu, es mostra a la figura B11.13. L'impacte d'aquesta desviació en diferents escenaris de descàrrega del riu (prenent com a any típic 1999 o l'any mitjà de la dècada 1990-1999 apareix a la taula B11.4).

La principal conclusió és que la disminució del cabal líquid del riu afectaria negativament la intrusió de la falca salina. Amb uns cabals com els de l'any 1999, l'estuari evolucionaria d'una situa-

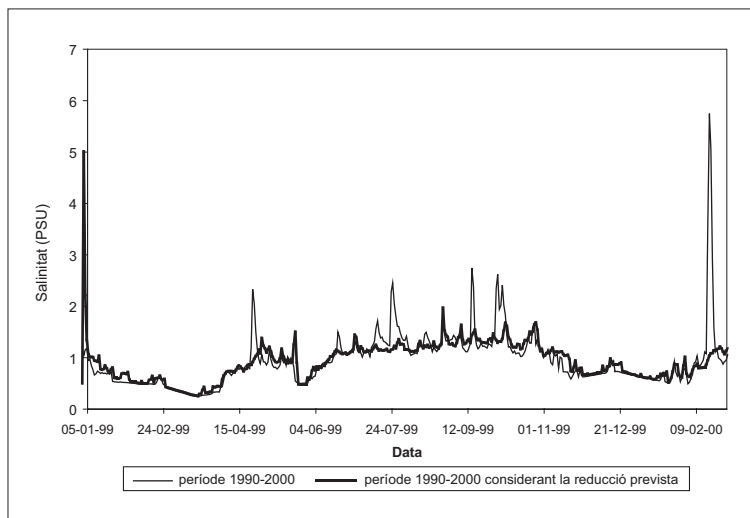


Figura B11.11. Valors de salinitat de la capa superior (al mig de l'estuari) considerant la reducció prevista al pla de transvasament (període 1999-2000) i sense considerarla.

Font: elaboració pròpia.

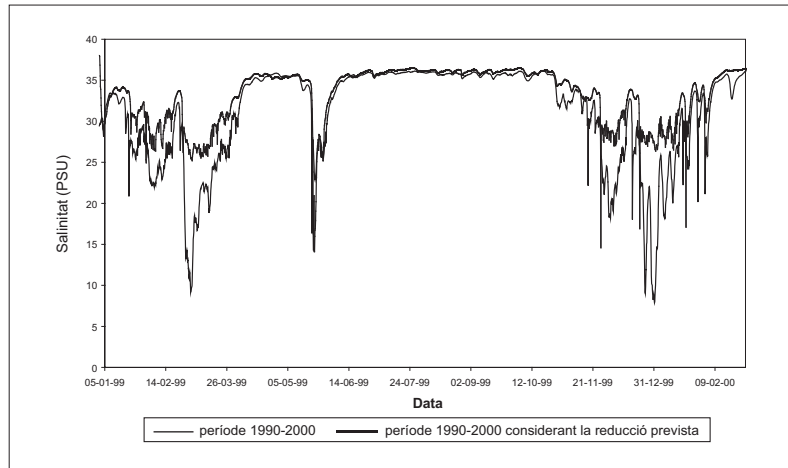


Figura B11.12. Valors de salinitat de la capa inferior (al mig de l'estuari), tenint en compte la reducció prevista al pla de transvasament (període 1999-2000) i sense considerar cap reducció atribuïble al transvasament. Font: elaboració pròpia.

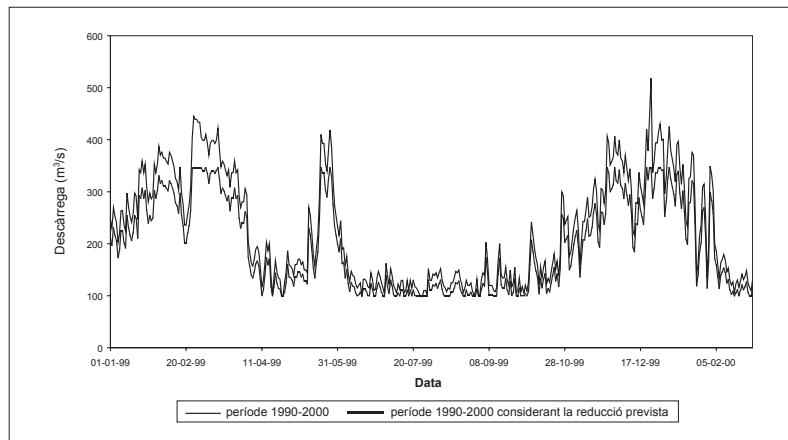


Figura B11.13. Descàrrega del riu amb la reducció associada a l'esquema de transvasament proposat i sense considerar-la. Font: elaboració pròpia.

ció en què no hi ha falca salina durant 16 dies a una situació en què la falca salina està permanentment present (Siecca et al., 2004). Per aquest motiu, tant l'extensió com la persistència de la falca salina són dues de les principals variables que, des del punt de vista físic, governen l'impacte climàtic en zones estuàries. A partir d'elles es poden obtenir relacions amb descàrregues de nutrients i sediments que també afecten la dinàmica costanera i la productivitat biològica de la zona.

Aquests canvis climàtics a escala regional també afectaran altres trams de la costa catalana, amb més intensitat com més petit sigui el seu volum sedimentari i, per tant, la seva capacitat de reserva o resistència. A títol il·lustratiu, les zones amb cadenes de dunes a la rera platja resistiran de manera molt més eficient qualsevol augment en la intensitat de les tempestes o ascens del nivell mitjà del mar. De la mateixa manera, aquests canvis en la climatologia afectaran les infraes-

Zones costaneres: dinàmica sedimentària Agustín Sánchez Arcilla, José A. Jiménez i Joan Pau Sierra

Penetració de la falca salina L	1999 sense reducció	1990-1999 sense reducció	1999 amb reducció de 1.050 Hm <sup>3</sup>	1990-1999 amb reducció de 1.050 Hm <sup>3</sup>
Fora de l'estuari	4,5%	17,1%	0,0%	10,8%
1 < L < 5 km	18,4%	13,6%	7,6%	9,6%
5 < L < 10 km	4,5%	5,3%	3,6%	4,1%
10 < L < 15 km	16,0%	24,4%	23,5%	31,8%
15 < L < 20 km	11,4%	9,8%	14,7%	11,7%
20 < L < 25 km	32,6%	22,0%	14,1%	7,8%
25 km	12,6%	7,7%	36,4%	24,1%
Màxima (km)	28,4%	25,48%	31,24%	32,10%

Taula B11.4. Penetració de la falca salina (freqüències en %) sense reducció de cabals l'any 1999 i amb reducció, i un any mitjà virtual del període 1990-1999.

Font: elaboració pròpia.

estructures costaneres, tant pel que es refereix al nivell mitjà com a la intensitat de les tempestes. En efecte, les estructures costaneres han estat projectades per a un clima d'onatge determinat. Qualsevol augment en el nivell mitjà del mar també suposarà un increment en l'energia de les ones que arriben fins aquesta estructura i, per tant, una disminució de la seva seguretat envers la seva destrucció. Des del punt de vista funcional, qualsevol augment del nivell mitjà del mar o de la intensitat de les tempestes suposarà un augment de l'ascens de l'aigua sobre aquestes estructures i, per tant, del volum d'ultrapassament i paràmetres similars. Tots ells han de tenir-se en compte a l'hora d'avaluar l'impacte d'un possible canvi climàtic a escala regional.

### B11.7. Vulnerabilitat i risc

La vulnerabilitat se sol definir com el producte de la probabilitat de fallida del sistema, multiplicat per l'avaluació dels danys associats. El risc o probabilitat de fallida del sistema ha de quantificar-se tenint en compte l'escala de temps i espai considerades i les incerteses existents en el càlcul. Així mateix, l'avaluació de danys ha de considerar aquestes escales de temps i espai i

utilitzar un procediment que incorpori tant la resposta negativa com positiva del sistema. La resposta negativa o susceptibilitat indica una degradació del sistema o la seva inhabilitat per enfrontar-se als termes modeladors en el seu estat actual. La resposta positiva o «resiliència» implica una millora del sistema o de la seva habilitat per enfrontar-se als termes impulsors.

Per aplicar aquests conceptes a un procés costaner, és necessari introduir les escales de temps adequades i també és útil l'ús d'un índex de vulnerabilitat que resumeixi aquesta informació, moltes vegades difusa i imprecisa, en un conjunt limitat de paràmetres. Un índex de vulnerabilitat parcial proposat a Sánchez-Arcilla et al. (1998) és el següent:

$$V_i = Q_i \cdot S_i \cdot L_c + R_i \cdot L_c$$

on  $S_i$  és l'índex de susceptibilitat,  $R_i$  és l'índex de resiliència,  $L_c$  és un factor de control local que actua com a 1 o 0 (eventualment un valor intermedi), i  $Q_i$  és un índex que reflecteix l'extensió espacial del procés analitzat.



## El canvi climàtic a Catalunya Zones costaneres: dinàmica sedimentària

Tipus d'anàlisi	Mesura	Resposta	SI	RI
Absoluta	Canvi del «recurs»/ stock	Disminució	-1	0
		Manteniment/augment	0	1
Relativa	Sistema sota escenari/ referència	Empitjorament	-1	0
		Millora/sense canvi	0	1

Taula B11.5. Índexs de susceptibilitat (SI) i «resiliència» (RI) i resposta del sistema associat per tal de ser utilitzat en l'anàlisi de vulnerabilitat.

Font: elaboració pròpia.

Agent	SI	RI	Resposta
Descàrrega fluvial	-1	0	Disminució capacitat transport
	0	1	Augment capacitat transport
RSLR	-1	0	Acreció vertical < RSLR
	0	1	Acreció vertical = RSLR
RSLR	-1	0	Erosió costanera
	0	1	Estabilitat/acreció costanera
Processos barrera	-1	0	Rollover limitat
	0	1	Rollover augmentat
Clima d'onatge	-1	0	Augment capacitat transport
	0	1	Disminució de capacitat transport
	?	?	Canvi direcció transport

Nota: l'interrogant (?) significa que una valoració a priori no pot completar-se sense conèixer les conseqüències finals.

Taula B11.6. Índexs de susceptibilitat (SI) i «resiliència» (RI) a llarg termini per a agents que afecten la vulnerabilitat geomòrfica i processos associats a aquesta escala.

Font: elaboració pròpia.

Agent	SI	RI	Resposta
Switching fluvial	-1	0	Lòbul abandonat
	0	1	Lòbul creat
Switching fluvial	-1	0	Aportació sediment «protegida»
	0	1	Aportació «exposada»
Riuades	-1	0	Wash-out sediment
	0	1	Aportació sediment
Tempestes d'onatge	-1	0	Erosió / trencament
	0	1	Aportació sediment <i>hinterland</i>

Taula B11.7. Índexs de susceptibilitat (SI) i «resiliència» (RI) a escala episòdica per a agents que afecten la vulnerabilitat geomòrfica i processos associats a aquesta escala.

Font: elaboració pròpia.

Zones costaneres: dinàmica sedimentària Agustín Sánchez Arcilla, José A. Jiménez i Joan Pau Sierra

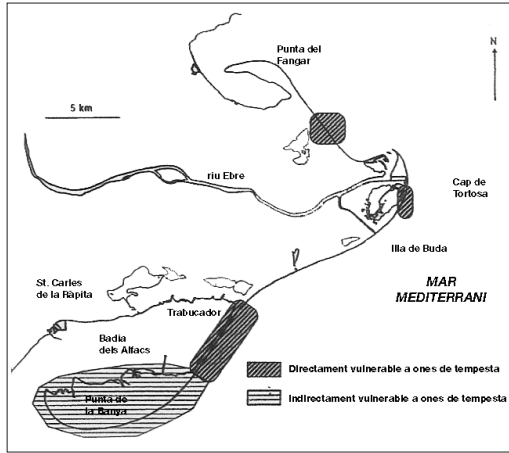


Figura B11.14. Índex de vulnerabilitat qualitatiu del delta de l'Ebre a escala «episòdica».

Font: elaboració pròpia.

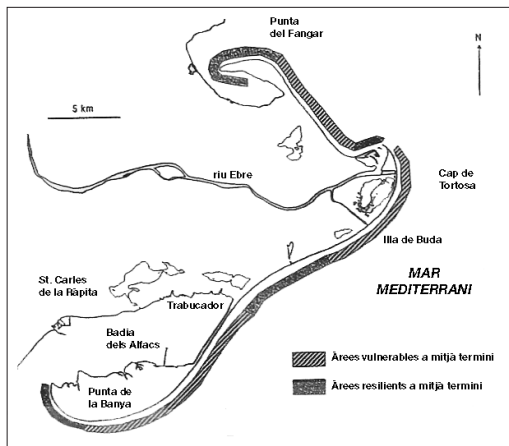


Figura B11.15. Vulnerabilitat causada pels canvis produïts a mig termini pel transport al llarg de la costa del delta de l'Ebre.

Font: elaboració pròpia.

La taula B11.5 mostra una il·lustració de l'avaluació binària dels índexs de susceptibilitat o resiliència per a un tram de costa determinat. Una aplicació d'aquesta metodologia als índexs a llarg termini de susceptibilitat i resiliència per a una zona deltaica (en aquest cas el delta de l'Ebre) es troba recollida a la taula B11.6. De la mateixa manera, l'avaluació de successos episòdics, els més determinants de la remodelació del substrat físic en qualsevol tram de costa, es mostra a la taula B11.7 per a la zona del delta de l'Ebre.

L'esquematització d'aquests índexs, amb la seva corresponent àrea de definició espacial, per a aquesta mateixa zona deltaica apareix a la figura B11.14. L'avaluació de la corresponent vulnerabilitat en una escala de termini mitjà apareix a la figura B11.15. Com pot observar-se al mapa de vulnerabilitat, canvia considerablement en funció de l'escala temporal seleccionada.

L'avaluació de la vulnerabilitat conjunta del sistema, tenint en compte els seus diversos components, requereix ampliar el marc d'anàlisi. Per això, és necessari esquematitzar el tram costaner explicitant els termes impulsors, els corresponents processos associats i com ambdós afecten els usos i recursos que aquest tram costaner suporta. Com a il·lustració del diagrama conceptual necessari per a una zona deltaica, la figura B11.16 mostra l'esquema derivat per a la zona costanera del delta de l'Ebre.

El punt clau d'aquest esquema és la identificació i la quantificació dels fluxos que lliguen uns elements amb altres. Aquests fluxos varien en magnitud i, fins i tot, en definició al canviar d'escala de temps. Per exemple, les pràctiques de reg i la construcció de preses i embassaments no afecten l'erosió costanera a curt termini, però sí que juguen un paper determinant en la dinàmica costanera a mitjà i llarg termini. Això és degut al control que exerceixen ambdós elements en l'aportació sòlida que el riu lliura a la costa.

### B11.8. Les estratègies de resposta

Les estratègies clàssiques de gestió costanera comprenen el retrocés, l'adaptació i la defensa del litoral. Aquestes mateixes estratègies són d'aplicació envers un eventual canvi climàtic a escala regional.

L'estratègia de retrocés requereix, en primer lloc, l'espai necessari per a la reubicació dels usos i recursos que suporta el tram costaner. Aquesta estratègia, en cas d'existir el recurs espai necessari, és la més concordant amb les grans incerteses associades a la predicció del canvi climàtic a escala

regional i no suposa cap hipoteca de la zona a escales futures de temps. L'estratègia d'adaptació requereix un plantejament diferenciat per a l'erosió i la inundació. Així mateix exigeix una flexibilitat social i econòmica, augmentada pel nivell d'incertesa en les prediccions, que no és fàcil d'aconseguir.

Els riscos i els costos associats al procés d'inundació poden predir-se amb uns certs límits d'incertesa i han de ser, en qualsevol cas, ben coneguts per tots els usuaris i gestors de la franja costanera. Les defenses davant de les inundacions requeriran, de la mateixa manera, un manteniment continuat, i el seu eventual recreixement davant la possible subsidència del tram costaner o el corresponent augment eustàtic del nivell mitjà del mar. Aquesta és la pràctica de països com Holanda, enfrontats secularment a aquest problema.

L'estratègia de lluita contra l'erosió, des de la perspectiva de l'adaptació, requereix així mateix la ubicació d'estructures i usos flexibles a la interfase terra-mar. La tendència que actualment està acceptada de forma més universal va associada a la utilització d'una vegetació de recolzament i dissipació que permeti esmorteir els riscos d'erosió.

L'estratègia de defensa habitualment més acceptada per la societat a causa del seu «aparent» monolitisme, requereix uns costos inicials importants i cal no oblidar que també requereix costos de manteniment. La història de les estructures de defensa i protecció costanera al llarg de la costa del Maresme són un bon exemple de la necessitat de manteniment constant. Per aquest motiu, aquesta estratègia de defensa, tant davant de l'erosió com de la inundació, només pot plantejar-se per trams de costa concrets i sempre tenint en compte l'horitzó temporal. També s'ha de considerar el seu nivell d'incerte-

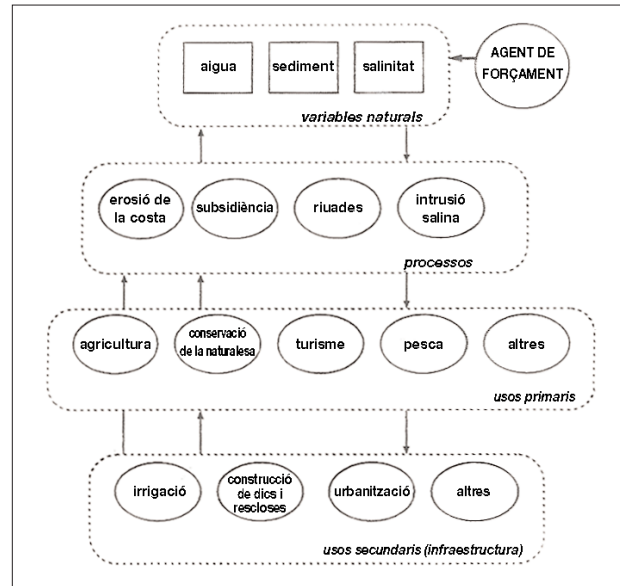


Figura B11.16. Esquema del sistema deltaic segons els processos i usos principals. Font: adaptat de Otter et al., 1996.

sa, tant en la resistència estructural de la solució adoptada com en el seu disseny funcional.

La millor solució, per a qualsevol escala temporal seleccionada, consisteix en la combinació dels tres elements, tot això dins del marc d'un pla integral de la zona costanera.

### B11.9. La planificació costanera

Com ja s'ha esmentat anteriorment, la gestió i l'ordenació de la zona costanera, a qualsevol escala de temps, requereixen una planificació que intenti harmonitzar els diferents usos i recursos que aquesta zona suporta amb la seva dinàmica natural intrínseca. Davant d'un possible canvi climàtic a escala regional, caldrà introduir en aquesta planificació la dinàmica afegida al canvi en la climatologia. Aquesta exigència pot concretar-se en:

- Incorporar escenaris de canvi climàtic a escala regional que permetin quantificar el canvi en els termes impulsors i en la corresponent resposta costanera. Això suposa un coneixement

adequat de la climatologia terrestre, fluvial, marítima i atmosfèrica a escala local i sèries temporals suficientment llargues de les variables climatològiques necessàries.

- La decisió d'actuar anticipadament per permetre la remodelació de les estructures costaneres. Això és degut al fet que no és possible enfrontar-se de forma simultània i impulsiva a la remodelació de les estructures costaneres de tota la costa catalana, ja que qualsevol petita actualització requerirà un termini de l'ordre d'una dècada abans de poder-se finalitzar. Per això cal actuar anticipadament a l'ocurrència del canvi en la climatologia, per gradual que aquest sigui.
- Un pla integrat d'usos i recursos en la zona costanera, que disminueixi els conflictes existents entre ells i eviti la hipoteca d'aquesta zona envers futures alteracions climàtiques. Aquest pla ha d'incorporar la incertesa i limitació en el coneixement dels termes impulsors i la corresponent resposta costanera. Aquest pla també ha d'estar adaptat als diversos valors que existeixen en aquesta zona, en particular els valors naturals, els valors econòmics i els valors socials. Finalment, aquest pla ha d'estar adequat a la legislació local, autonòmica, estatal i europea que afecta la zona costanera.

La planificació costanera, complint els anteriors requisits, ha de realitzar-se en primer lloc per a les zones costaneres més vulnerables a un canvi eventual en la climatologia. Pel que fa a la costa catalana, aquestes zones són:

- Els deltes i els estuaris, pel delicat equilibri de factors naturals que els configuren.
- Les costes rígides per efecte de les infraestructures de diversos tipus (carreteres, ferrocarrils, passeigs marítics, etc.), ja que estan en contra del caràcter intrínsec (dinàmic) de la franja costanera.

En ambdós casos, aquests plans han de considerar l'erosió generalitzada de tota la costa del pla-

neta. Aquesta erosió és deguda, en primer lloc, a una falta generalitzada de material sedimentari i, en segon lloc, a un canvi o acceleració en la climatologia.

#### **B11.10. Les campanyes d'observació**

La primera conclusió és que la mesura de la vulnerabilitat o el risc de la zona costanera a un eventual canvi climàtic a escala regional ha d'incorporar el dinamisme d'aquesta zona. Dit això és important, en termes, per exemple, de l'erosió, no mesurar la posició de la línia de costa, que és dinàmica, sinó la taxa d'erosió, i comparar aquesta taxa d'erosió en un escenari de canvi climàtic amb l'actual taxa d'erosió. Addicionalment ha de comparar-se també el «consum» en el recurs costaner considerat amb el volum existent d'aquest recurs. Pel procés d'erosió, per exemple, s'ha de considerar el retrocés estimat de la línia de costa en un horitzó temporal de, per exemple, dues dècades, amb l'amplada que la platja té actualment. La probabilitat de fallada dependrà, lògicament, del romanent de platja que existeixi una vegada consumat aquest procés erosiu.

Des del punt de vista de les principals variables afectades per un eventual canvi climàtic, per a les zones costaneres baixes, s'ha fet referència als processos d'erosió i inundació. L'eventual canvi en la climatologia suposarà:

- Un augment dels processos erosius, especialment als trams costaners més sensibles, com poden ser les costes deltaïques i estuarianes
- Una disminució del període de retorn dels successos d'inundació associats, al litoral mediterrani, a marees meteorològiques (amb una disminució del període de retorn en un ordre de magnitud, de 70 a 7 anys per exemple, tal com s'ha exposat en seccions anteriors).

Pel que fa les zones estuarianes, les dues principals variables a què s'ha fet referència són la penetració de la falca salina i el seu període de residència. Un augment del nivell mitjà del mar relatiu anirà associat a un increment en la dis-

tància de penetració de la falca salina, amb els conseqüents problemes de salinització i a un major temps de residència d'aquella. Pel contrari, un augment en els processos de precipitació torrencial afavorirà la presència de breus períodes sense falca salina, amb la conseqüent renovació de volums d'aigua anòxics i l'associada millora en la qualitat de l'aigua.

Per a una quantificació precisa de tots aquests processos i efectes cal disposar de sèries temporals prou llargues que permetin detectar el possible canvi de climatologia a escala regional. Aquestes campanyes d'observació han de tenir un nivell de qualitat i precisió suficient, ja que han de registrar petits canvis que succeiran de manera molt gradual. Com a exemple, l'ascens eustàtic del nivell mitjà del mar és, aproximadament, d'1 mm anual, per la qual cosa les campanyes de mesura han de poder permetre estimar aquest ordre de magnitud, tot i que la quantificació definitiva requereixi períodes d'observació superiors a la dècada. Això suposa un esforç observacional notable i el benefici del qual únicament serà aparent per a les properes generacions.

Quant a les variables clau que cal monitoritzar per detectar aquest canvi en la climatologia, poden dividir-se en dos grans grups: les variables associades als termes impulsors i les variables associades a la resposta del substrat costaner. De les variables associades als termes impulsors s'ha donat especial rellevància a les següents:

- Clima d'onatge.
- Clima de vent i pressió atmosfèrica.
- Clima del nivell mitjà del mar.
- Clima de descàrrega líquida i sòlida dels rius.

Pel que es refereix a la resposta física del substrat costaner, tal com s'ha esmentat anteriorment, les variables clau fan referència al comportament en planta i perfil del tram costaner. No és necessari monitoritzar amb el mateix grau d'intensitat tots els sectors costaners: caldrà prioritzar aquells amb una major vulnerabilitat natural (deltes o

estuàries) o aquells que per la seva «rigidització» antropològica o els seus elevats valors socioeconòmics així ho requereixin.

### B11.11. Conclusions

Encara que el més «natural» en el clima és la seva variabilitat i el seu canvi permanent, avui dia hi ha consens en el món científic respecte a l'acceleració i globalització en el canvi d'algunes variables climàtiques. L'augment de la temperatura mitjana global del planeta n'és una mostra.

Aquest «canvi climàtic» a escala global és molt més difícil de quantificar, tant en magnitud com en signe, a escala regional o local. Tot i això, i pel fràgil equilibri i alt valor de la zona costanera, és necessari començar a actuar, assumint que aquest canvi climàtic és cert i «durador» a una escala decadal, que és la que correspon a les actuacions i vida humana.

D'acord amb la revisió de termes impulsors realitzada anteriorment, els principals factors modeladors de la costa associats al possible canvi climàtic són:

- L'ascens relatiu del nivell mitjà del mar, ja que tot i que la component eustàtica és l'associada al canvi climàtic, la costa només reacciona a l'ascens relatiu.
- L'augment en la persistència de les tempestes i el lleuger increment en la seva intensitat (almenys a l'Atlàntic nord). Aquest creixement de la persistència augmenta tanmateix els processos d'erosió i inundació, ja que no permet la recuperació natural del cos sedimentari.
- L'augment de la freqüència d'inundacions (disminució del seu període de retorn), amb la conseqüent disminució de la capacitat de recuperació natural dels trams afectats.
- La disminució del volum sedimentari disponible a les costes sorrenques de Catalunya que, tal com s'ha indicat anteriorment, es deu a l'erosió acreixentada per l'ascens relatiu del nivell mitjà del mar i a la disminució de l'aportació sedimentària dels rius. Aquesta disminució, inde-

pendentment d'altres factors, està associada des del punt de vista del canvi climatològic a la torrencialització dels règims fluvials i l'augment de les pèrdues cap a la plataforma continental.

La resposta de la costa a aquests factors modeladors depèn, tal com s'ha indicat, de la morfologia costanera. Les costes sedimentàries baixes són les que respondran primer a aquests canvis i, per aquest motiu, la tipologia més vulnerable a aquest canvi climatològic correspon a deltes i estuaris. En ambdós ambients és previsible una acceleració dels actuals processos d'erosió i inundació associats al canvi climàtic previst.

Aquesta resposta disminueix la probabilitat de supervivència d'aquestes zones costaneres en el seu estat actual, fet que suposa un augment de la seva vulnerabilitat (tal com s'ha definit anteriorment) ja que tant els deltes com els estuaris compleixen importants funcions naturals i econòmiques.

En particular, els principals deltes de la costa catalana, inclosos els de l'Ebre, Llobregat i Tordera, juntament amb la resta d'aiguamolls costaners, apareixen com a directament amenaçats per aquest canvi local en la climatologia. L'augment relatiu del nivell mitjà del mar, la carència progressiva d'aportacions sedimentàries i la major persistència i freqüència de les tempestes marines implicaran una pèrdua de territori costaner, a menys que s'actui de manera urgent.

Aquesta actuació ha de començar amb suficient antelació a fi d'anticipar-se al possible canvi climàtic, ja que no serà factible defensar totes les costes baixes de Catalunya simultàniament i en un període de temps curt. Per tot això és recomanable començar des d'ara la planificació de les estratègies de resposta per poder disposar d'una a dues dècades de marge en la seva implementació, tal com realitzen països més directament amenaçats.

Les estratègies de resposta possibles han de considerar la geomorfologia, l'ecologia i l'economia

de cadascun dels trams costaners, juntament amb les infraestructures existents i la percepció social i valors culturals de les comunitats que «utilitzen» aquests trams. La valoració de les funcions naturals i econòmiques justificaran o limitaran la inversió per encarar-se al canvi climàtic local. Qualsevol actuació costanera haurà de poder integrar-se en una planificació integral del tram, entenent com a tal la unitat fisiogràfica, ecològica i socioeconòmica corresponent. Aquestes actuacions, tal com s'ha indicat, seran essencialment de dos tipus: les actuacions de retrocés, que han de valorar acuradament les implicacions de la pèrdua de territori i la disponibilitat d'espai a la franja costanera, i les actuacions de protecció i/o defensa, que han de valorar, també acuradament, els costos de construcció inicial i manteniment junt amb les implicacions de l'impacte costaner d'aquestes obres.

En ambdós casos s'hauran de realitzar les valoracions amb un horitzó temporal únic i consistent amb la velocitat de canvi previst per a la climatologia. Aquest és l'únic enfocament que permetrà una comparació sota diversos escenaris de canvi climàtic. Aquesta anàlisi caldrà que es realitzi en el marc d'una gestió integral de la zona costanera que tingui molt present el seu caràcter dinàmic i la impossibilitat de mantenir (sostenir) una línia de costa «fixa» en la seva posició actual.

#### **Agraïments**

Aquest text s'ha basat en diversos projectes de recerca, passats i presents. Dins d'aquests darrers mereixen especial atenció el projecte *PREVIMED* (REN2002-03415, Ministerio de Ciencia y Tecnología) i el projecte *ECOSUD* (ICA4/CT200110027), Comissió Europea i la fase de preparació del projecte *FLOODSITE* (contracte en tràmit FP6-505420, Comissió Europea). Els autors també voldrien agrair l'aportació del personal de recerca del Laboratori d'Enginyeria Marítima de la Universitat Politècnica de Catalunya (LIM/UPC) i del Centre Internacional d'Investigació dels Recursos Costaners (CIIRC).

### Referències bibliogràfiques

- ACKERS, P.; WHITE, W.R. (1973). «Sediment Transport: New Approach and Analysis». *J. Hydraulic Div. ASCE*, núm. 99, HY11, p. 2041-2060.
- ARAGÓN, J. (1943). *Informe Sobre la Salinidad del Agua del Ebro, Informe Técnico*. Madrid, Instituto Nacional de Colonización.
- BARNETT, T.P. (1990). «Low-Frequency Changes in Sea Level and their Possible Causes». A: LeMehaute, B. i Hanes, D. (eds.) *Ocean Engineering Science*. New York: Wiley-Interscience, p. 841-867. (The Sea, vol. 10).
- BROADUS, J.; MILLIMAN, J.D.; EDWARDS, S.F.; AUBREY, D.G.; GABLE, F. (1986). «Rising Sea Level and Damming of Rivers: Possible Effects in Egypt and Bangladesh». In Titus, J.G. (ed.), *Effects of Change in Stratospheric Ozone and Global Climate*, vol. 4, Sea Level Rise, UNEP/EPA, p. 165-189.
- BRUUN, P. (1962). «Sea-Level Rise as a Cause of Shore Erosion». *J. Waterw. Harbours Div. ASCE* 88, WW1, p. 117-130.
- CARTER, D.J.T.; DRAPER, L. (1988). «Has the North Sea become Rougher?». *Nature*, núm. 332, p. 494.
- COLEMAN, J.M.; WRIGHT, L.D. (1973). «Variability of Modern River Deltas Gulf Coast». *Ass. Geol. Soc. Trans.* núm. 23, p. 33-36.
- DAY, J.W.; TEMPLET, P.H. (1989). «Consequences of Sea Level Rise: Implications from the Mississippi Delta». *Coast. Managem.*, núm. 17, p. 241-257.
- DE VALK, C.F. de (1994). A Model of the Probability Distribution of Bivariate Storms Extremes Implemented to Computer Simple Risks Estimates, Report H2131, Delft Hydraulics.
- DE VRIEND, H.J. (1991). «Mathematical Modelling and Large-Scale Coastal Behaviour. Part I: Physical Processes». *J. Hydraulic Res.*, núm. 29, 6, p. 727-740.
- DE VRIEND, H.J.; CAPOBIANCO, M.; CHESCHER, T.; DE SWART, H.E.; LATTEUX, B.; STIVE, M.J.F. (1994). «Long-Term Modelling of Coastal Morphology». *Coastal Eng.*, núm. 21, p. 225-269.
- DELFT HYDRAULICS (1993). *Sea Level Rise. A Global Vulnerability Assessment*. (2nd Revised Edition), The Netherlands.
- DYER, K.R. (1997). *Estuaries: A Physical Introduction*. Chichester: John Wiley & Sons.
- EMERY, K.O.; AUSBREY, D.G. (1991). *Sea Levels, Land Levels and Tide Gauges* New York: Springer-Verlag, p. 237.
- GALLOWAY, W.E. (1975). «Process Framework for Describing the Morphologic and Stratigraphic Evolution of Deltaic Depositional Systems». A: Broussard, M.L. (ed.), *Deltas, Models for Exploration*. Houston: Houston Geological Society, p. 87-98.
- GUILLÉN, J.; DÍAZ, J.I.; PALANQUES, A. (1992). «Cuantificación y evolución durante el siglo XX de los aportes de sedimento transportado como carga fondo por el río Ebro al medio marino». *Rev. Soc. Geol. Esp.*, núm. 5, 27-37.
- GUILLÉN, J. (1992). *Dinámica y balance sedimentario en los ambientes fluvial y litoral del Delta del Ebro*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya. (Tesi doctoral).
- HOOZEMANS, F.M.J. (1990). «Long Term Changes in Wind and Wave Climate on the North Sea». In Proc. 22nd Coastal Eng. Conf., ASCE, p. 1888-1894.
- IBAÑEZ, C. (1993). *Dinámica hidrológica y funcionamiento ecológico del tramo estuarino del río Ebro*. Tesis doctoral, Universitat de Barcelona, Barcelona.
- IBAÑEZ, C.; PRAT, N.; CANICIO, A. (1996). «Changes in the Hydrology and Sediment Transport Produced by Large Dams on the Lower Ebro River and its Estuary». *Regulated Rivers: Research & Management*, núm. 12, p. 51-62.
- IPCC, 1992, Global Climate Change and the Rising Challenge of the sea. CZM Subgroup, Rijkswatersaat, M. Public Works, The Hague.
- JIMENEZ, J.A.; VALDEMORO, H.I.; SANCHEZ-ARCILLA, A.; STIVE, M.J.F. (1993). «Erosion and Accretion of the Ebro Delta Coast: a Large Scale Reshaping Process». In Large Scale Coastal Behaviour'93, US Geological Survey, Open File Report 93-381, p. 88-91.
- JIMENEZ, J.A.; GARCIA, M.A.; SANCHEZ-ARCILLA, A. (1990). Análisis y Propuesta de Soluciones para Estabilizar el Delta del Ebro. Estimación del Transporte de Sedimentos en el Ebro. Contribucion a la Evolución Costera, Informe Técnico LT-2/7, Generalitat de Catalunya, Barcelona, p. 25.
- JIMENEZ, J.A.; SANCHEZ-ARCILLA, A. (1993). «Medium-Term Coastal Response at the Ebro Delta, Spain». *Marine Geology*, núm. 114, p. 105-118.
- JIMENEZ, J.A.; SANCHEZ-ARCILLA, A. (1997). «Physical Impacts of Climatic Change on Deltaic Coastal Systems (II): Driving Terms». *Climatic Change*, núm. 35, p. 95-118.
- JIMÉNEZ, J.A.; SÁNCHEZ-ARCILLA, A.; VALDEMORO, H.I.; GRACIA, V.; NIETO, F. (1997). «Processes reshaping the Ebro delta». *Marine Geology*, núm. 144, p. 59-79.

- JIMÉNEZ, J.A.; GUILLÉN, J.; GRACIA, V.; PALANQUES, A.; GARCÍA, M.A.; SÁNCHEZ-ARCILLA, A.; PUIG, P.; PUIGDEFÁBREGAS, J.; RODRÍGUEZ, G. (1999). «Water and sediment fluxes on the Ebro delta shoreface: On the role of low frequency currents». *Marine Geology*, núm. 157, p. 219-239.
- KATZ, R.W.; BROWN, B.G. (1992). «Extreme Events in Changing Climate: Variability is More Important than Averages». *Clim. Change*, vol. 21, núm. 3, p. 289-302.
- LEE, A.C.; OSBORNE, R.H. (1995). «Relative Fluxes of Sand for Southern California Beaches: Fourier Grain-Shape Analysis». *Shore & Beach*, vol. 63, núm. 3, p. 9-19.
- LINDZEN, R.S. (1994). «Climate Dynamics and Global Change». *Ann. Rev. Fluid Mech.*, núm. 26, p. 353-378.
- LUOISSE, C.J.; KUIK, A.J. (1990). «Coastal Defense Alternatives in the Netherlands». A: *Proc. 22nd Coastal Engineering Conference*, ASCE, p. 1.862-1.875.
- MITCHELL, J.F.B.; MANABE, S.; TOKIOKA, T.; MELESHKO, V. (1990). «Equilibrium Climate Change and its Implications for the Future». A: Houghton, J.T., Jenkins, G.J., Ephraums, J.J. (eds.). *Climate Change. The IPCC Scientific Assessment*. Cambridge: Cambridge University Press, p. 131-172.
- MITOSEK, H.T. (1995). «Climate Variability and Change within the Discharge Time Series: A Statistical Approach». *Clim. Change*, vol. 29, núm. 1, p. 101-116.
- MORHANGE, C. (1994). *La mobilité recente des Littoraux Provençaux: Elements d'Analyse Géomorphologique*. Aix-en-Provence: Université de Provence. (Thèse de 3ème cycle.)
- NAKATO, T. (1990). «Tests of Selected Sediment-Transport Formulas». *J. Hydraulic Eng.*, vol. 116, núm. 3, p. 362-379.
- PALUTIKOF, J.P. (1993). «Mediterranean Land Use and Desertification - The Medalus Project». A: Troen, I. (ed.) *Proc. Symp. Climate Change and its Impacts*. Copenhagen, p. 165-172.
- PALUTIKOF, J.P.; GUO, X.; WIGLEY, T.M.L.; GREGORY, J.M. (1992). «Regional Changes in Climate in the Mediterranean Basin due to Global Greenhouse Gas Warning». Athens: UNEP, p. 172. (MAP Technical Reports Series, 66).
- PIRAZZOLI, P.A. (1991). *World Atlas of Holocene Sea-Level Changes*. Amsterdam: Elsevier, p. 300.
- RAPER, S.C.B. (1993). «Observational Data on the Relationships between Climatic Change and the Frequency and Magnitude of Severe Tropical Storms». A: Warrick, R.A., Barrow, E.M., Wigley, T.M. (eds.) *Climate and Sea Level Change. Observations, Projections and Implications*. Cambridge: Cambridge University Press, p. 192-212.
- SANCHEZ-ARCILLA, A.; JIMENEZ, J.A. (1994). «Breaching in a Wave-Dominated Barrier Split: The Trabucador Bar (Northeastern Spanish Coast)». *Earth Surf. Proc. Landf.*, núm. 19, p. 483-498.
- SANCHEZ-ARCILLA, A.; STIVE, M.J.F.; JIMENEZ, J.A.; GARCIA, M.A. (1993). «Impacts of Sea Level Rise in a Mediterranean Delta: The Ebro Delta Case». A: *Sea Level Changes and their Consequences for Hydrology and Water Management, Seachange'93*. UNESCO IHP-IV, IV p. 53-62.
- SANCHEZ-ARCILLA, A.; JIMENEZ, J.A. (1997). «Physical Impacts of Climatic Change on Deltaic Coastal Systems (I): An Approach». *Climatic Change*, núm. 35, p. 71-93.
- SANCHEZ-ARCILLA, A.; JIMENEZ, J.A.; VALDEMO-RO, H.I. (1998). «The Ebro Delta: Morphodynamics and Vulnerability». *Journal of Coastal Research*, vol. 14, núm. 3, p. 754-772.
- SCHLESINGER, M.E. (1993). «Model Projections of CO<sub>2</sub>-Induced Equilibrium Climate Change». A: Warrick, R.A., Barrow, E.M., Wigley, T.M. (eds.) *Climate and Sea Level Change. Observations, Projections and Implications*. Cambridge: Cambridge University Press, p. 169-191.
- SCOR (Scientific Committee on Ocean Research) (1991). «The Response of Beaches to Sea-Level Changes: A Review of Predictive Models». *J. Coastal Res.*, vol. 7, núm. 3, p. 895-921.
- SESTINI, G.; JEFTIC, L.; MILLIMAN, J.D. (1989). *Implications of Expected Climate Changes in the Mediterranean Region: an Overview*. Atenes: UNEP, p. 52. (MAP Technical Reports Series, 27).
- SIERRA, J.P.; SANCHEZ-ARCILLA, A.; GONZALEZ DEL RIO, J.; FLOS, J.; MOVELLAN, E.; MOSSO, C.; MARTINEZ, R.; RODILLA, M.; FALCO, S.; ROMERO, I. (2002). «Spatial Distribution of Nutrients in the Ebro Estuary and Plume». *Continental Shelf Research*, vol. 22, núm. 2, p. 361-378
- SIERRA, J.P.; SANCHEZ-ARCILLA, A.; FIGUERAS, P.A.; GONZALEZ DEL RIO, J.; RASMUSSEN, E.K.; MOSSO, C. (2004). «Effects of Discharge Reductions on Salt Wedge Dynamics of the Ebro River». *River Res. Applic.*, núm 19, p. 1-17.
- SUANEZ, S. (1995). «Estimation de la Remontée Relative du Niveau Marin et des Mouvements du Sol dans le Delta du Rhône a Partir des Enregistrements Maregra-



- phiques». *Meeting on Impact of RSLR in the European Coast, Aix-en-Provence* (Also submitted to *Compte Rendu de l'Académie des Sciences de Paris*).
- SUHAYDA, J.N. (1987). «Subsidence and Sea Level». A: Turner, R.E., Cahoon, D.R. (eds.). *Causes of Wetlands Loss in the Coastal Central Gulf of Mexico. Volume II: Technical Narrative*. New Orleans: OCS Study/MMS 87-0120, Minerals Management Service, p. 187-202.
- STANLEY, D. (1988). «Subsidence in the Northeastern Nile Delta: Rapid Rates, Possible Causes and Consequences». *Science*, núm. 240, p. 497-500.
- THOMAS, R.H. (1986). «Future Sea Level Rise and Its Early Detection by Satellite Remote Sensing». A: Titus, J.G. (ed.) *Effects of Changing Stratospheric Ozone and Global Climate, vol. 4: Sea Level Rise*. UNEP, EPA, p. 19-36.
- VAN RIJN, L.C. (1984a). «Sediment Transport. Part I: Bed Load Transport». *J. Hydraulic Eng.*, vol. 110, núm. 10, p. 1.431-1.456.
- VAN RIJN, L.C. (1984b). «Sediment Transport. Part II: Suspended Load Transport». *J. Hydraulic Eng.* vol. 110, núm. 11, p. 1.613-1.641.
- VAN RIJN, L.C. (1993). *Principles of Sediment Transport in River, Estuaries and Coastal Seas*. Amsterdam: Aqua Pub., p. 654 i annexos.
- VARELA, J.M.; GALLARDO, A.; LÓPEZ DE VELASCO, A. (1986). «Retención de sólidos por los embalses de Mequinenza y Ribarroja. Efectos sobre los aportes al Delta del Ebro». A: Marino, M.G. (ed.) *Sistema Integrado del Ebro: Cuenca, Deltas y Medio Marino*. Madrid: Hermes, p. 203-219.
- WARRICK, R.A. (1993). «Climate and Sea Level Change: A Synthesis». A: Warrick, R.A., Barrow, E.M., Wigley, T.M. (eds.) *Climate and Sea Level Change. Observations, Projections and Implications*. Cambridge: Cambridge University Press, p. 3-21.
- WARRICK, R.A.; OERLEMANS, J. (1990). «Sea Level Rise». A: Houghton, J.T., Jenkins, G.J., Ephraums, J.J. (eds.) *Climate Change: The IPCC Scientific Assessment*. Cambridge: Cambridge University Press, p. 257-282.
- WIGLEY, T.M.L.; RAPER, S.C.B. (1993). «Future Changes in Global Mean Temperatures and Sea Level». A: Warrick, R.A., Barrow, E.M., Wigley, T.M. (eds.) *Climate and Sea Level Change. Observations, Projections and Implications*. Cambridge: Cambridge University Press, p. 111-133.
- WOLFF, W.J.; DIJKEMA, K.S.; ENS, B.J. (1993). *Expected Ecological Effects of Sea Level Rise*. The Hague: Ministry of Transport, Public Works and Water Management, Seachange'93, p. 139-150.
- WRIGHT, L.D. (1987). «Shelf-Surfzone Coupling: Diabathic Shoreface Transport». *Coastal Sediments'87*, ASCE, p. 25-40.
- WRIGHT, L.D.; COLEMAN, J.M. (1973). «Variations in Morphology of Major River Deltas as Functions of Ocean Wave and River Discharge Regimes», *AAPG Bull.*, núm. 57 (2), p. 370-398.