

# 11 Ecosistemes marins i costaners

## Autors

Carles Pelejero

Joandomènec Ros

Rafel Simó

**Carles Pelejero** és llicenciat en ciències químiques per la UAB (1991) i doctor en química per la UB (2000). Des de l'any 2001 fins al 2005 va dur a terme una estada postdoctoral a la Universitat Nacional d'Austràlia i a Geoscience Australia, Canberra. L'any 2005 va iniciar la recerca a l'Institut de Ciències del Mar (CSIC), on l'any 2006 va ser contractat per l'ICREA com a professor d'investigació. La recerca, que abraça disciplines com la paleoclimatologia, la paleoceanografia i la química marina se centra a entendre i quantificar els canvis en el clima i el medi marí, tant actualment com en el passat. Durant els últims anys ha estat fent recerca sobre els efectes de la progressiva acidificació dels oceans provocada per l'absorció marina del CO<sub>2</sub> que els humans emetem a l'atmosfera.

**Joandomènec Ros** és llicenciat en biologia (1968) i doctor en biologia (1973) per la UB. És catedràtic d'ecologia a la UB des del 1986, on va dirigir el Departament d'Ecologia. Com a especialista en ecologia marina (bentos marí, mol·luscs opisthobrànquies i conservació de la biodiversitat) ha coordinat programes de recerca, ha publicat més d'un centenar d'articles en revistes especialitzades i diversos llibres tècnics (*Prácticas de ecología, Els sistemes naturals de les illes Medes, Vora el mar broix, Introducción a la biología de la conservación*, etc.). És autor de llibres de divulgació sobre el medi ambient i la ciència en general i ha traduït un bon nombre de llibres d'eco-

logia, biologia evolutiva i biologia marina. Ha dirigit una quinzena de tesis, el Programa de Ciències del Mar de la Universitat de la Mediterrània (MEDCAM-PUS), el grup consolidat de recerca de la Generalitat de Catalunya Ecologia del Zoobentos Marí i la Càtedra UNESCO de Medi Ambient i Desenvolupament Durable de la UB. És membre de l'Institut d'Estudis Catalans (actualment n'és el president) i de diverses societats científiques i ha rebut la Medalla Narcís Monturiol al Mèrit Científic i Tecnològic. Participa en òrgans consultors del país i de l'estranger, com el Consell de Protecció de la Natura (que presideix), i ha estat rector de la Universitat Catalana d'Estiu.

**Rafel Simó** és llicenciat en ciències químiques per la UAB (1989), doctor en química per la UB (1995) i professor d'investigació del CSIC a l'Institut de Ciències del Mar, on treballa des del 1997. La recerca que duu a terme se centra a entendre i quantificar els intercanvis entre la biosfera dels oceans i l'atmosfera, i el paper que aquests intercanvis tenen en la regulació del clima del planeta. Amb aquest objectiu, fa servir un espectre ampli d'aproximacions, des de la biogeoquímica basada en mètodes moleculars fins a l'observació dels oceans i l'atmosfera des de l'espai, tot passant pels estudis d'ecologia i fisiologia del plàncton. Ha treballat al Mediterrani, l'Atlàntic, el Pacífic, l'Àrtic i l'Antàrtida. És coautor del llibre *Cambio global* (CSIC) i redactor del *Segon informe sobre el canvi climàtic a Catalunya*.

## Sumari

Síntesi .....	265
11.1. Introducció .....	266
11.2. Síntesi de l'evolució de variables fisicoquímiques de les aigües marines .....	266
11.2.1. Temperatura i nivell del mar .....	266
11.2.2. Salinitat .....	266
11.2.3. pH .....	267
11.2.4. Nutrients .....	268
11.2.5. Corrents marins i barreja vertical .....	268
11.3. Vulnerabilitat de comunitats mediterrànies d'elevada biodiversitat .....	269
11.3.1. Coral·ligen .....	269
11.3.2. Alguers de <i>Posidonia</i> .....	270
11.4. Canvis en relació amb l'espècie .....	272
11.4.1. Algues .....	272
11.4.2. Invertebrats .....	273
11.4.3. Peixos .....	274
11.5. Fenòmens amb impacte socioeconòmic directe .....	276
11.5.1. Proliferacions de meduses .....	276
11.5.2. Proliferacions d'algues tòxiques .....	277
11.6. Biodiversitat .....	278
11.7. Serveis ecosistèmics .....	280
11.8. Conclusions .....	282
11.9. Recomanacions .....	283
Referències bibliogràfiques .....	284

## Síntesi

La Mediterrània és una mar semitancada i que pateix una gran pressió a causa de l'activitat humana vora la costa, dos aspectes que la fan especialment vulnerable al canvi climàtic. Les observacions pluridecennals mostren que la mar catalana s'està escalfant a una velocitat de 0,3°C per decenni i que el nivell del mar augmenta gairebé quatre centímetres per decenni, i els models apunten que gairebé la meitat d'aquests canvis han estat causats per l'escalfament global d'origen antropogènic. Aquests canvis progressius, juntament amb episodis puntuals de sobreescalfament a l'estiu o amb un augment de les tempestes de tardor, tenen efectes en els ecosistemes marins. Les comunitats de coral·ligen dels fons litorals, formades sobretot per organismes sèssils i de creixement lent, experimenten episodis de mortaldats massives dels quals els costa molt recuperar-se. L'extensió dels alguers de *Posidonia* és sensible a la temperatura i a les variacions del nivell del mar. A l'ecosistema pelàgic, els models preveuen un increment de la producció primària bruta del fitoplàncton que no es veu reflectida en un augment de la productivitat planctònica neta perquè també s'incrementa la respiració. Tant entre els organismes sèssils com en els que es poden moure (vàgils), s'observa un desplaçament cap al nord d'algunes espècies

habituals al litoral català, mentre que la presència d'espècies termòfiles vingudes de més al sud augmenta. Els hiverns suaus, la poca pluviositat i els estius càlids afavoreixen els eixams de meduses a les platges. A més, algunes algues tòxiques es poden veure afavorides per aigües més càlides i més estratificades. Alguns d'aquests canvis constitueixen amenaces per als serveis de què els ecosistemes marins proveeixen la societat: referents culturals, recursos econòmics directes (turisme i pesca), protecció pel que fa a l'erosió, la captura i l'emmagatzemament de CO<sub>2</sub> atmosfèric, o l'aprofitament farmacèutic i industrial de la riquesa genètica i metabòlica. Malauradament, els agents climàtics actuen sinèrgicament i en la mateixa direcció que molts altres agents antròpics. Recomanem, doncs, que els esforços de mitigació de l'escalfament global vagin acompanyats d'esforços de millora i de regulació d'activitats d'impacte ambiental com ho són algunes arts de pesca, la pol·lució, l'explotació recreativa o la construcció. Es fa imprescindible, també, dissenyar i aplicar estratègies d'inversió en recerca i monitoratge i en protecció d'hàbitats singulars.

## Paraules clau

mar Mediterrània, mar catalana, organismes marins, ecosistemes marins, biodiversitat, serveis ecosistèmics

### 11.1. Introducció

La mar Mediterrània presenta una sèrie de característiques (profunditat mitjana moderada i ràpida renovació de les aigües, sobretot a la conca occidental) que la fan especialment sensible al canvi climàtic, amb impactes que es preveu que s'esdevinguin amb més rapidesa i intensitat que als oceans.

En aquest capítol presentem una síntesi de les darreres novetats pel que fa als efectes del canvi climàtic en els ecosistemes marins i costaners. El capítol s'estructura en sis parts fonamentals. En la primera, se sintetitzen les tendències d'alguns paràmetres fisicoquímics importants en el context del canvi climàtic: la temperatura i el nivell del mar, la salinitat, el pH, els nutrients, els corrents marins i la barreja vertical de la columna d'aigua. En la segona es comenten específicament dues de les comunitats mediterrànies amb una biodiversitat més elevada: el coral·ligen i els alguers de *Posidonia*. En la tercera s'analitzen canvis que s'han constatat en espècies d'algues, invertebrats i peixos. En la quarta s'avalua l'estat de la qüestió pel que fa a dos fenòmens amb impacte socioeconòmic directe: les proliferacions litorals de meduses i d'algues tòxiques. En la cinquena es discuteixen els possibles impactes del canvi climàtic en la biodiversitat. Finalment, en la sisena part s'incideix en les possibles afectacions en els serveis de què els ecosistemes marins proveeixen la població humana.

La confecció d'aquest capítol s'ha dut a terme, fonamentalment, sobre la base de la recopilació, per part dels autors, de treballs científics posteriors a la publicació del capítol equivalent del SICCC (Simó *et al.*, 2010), de manera que li ha servit de continuació, i amb la intenció d'actualitzar la informació allà on hi ha hagut els avenços més significatius. En alguns apartats s'ha rebut informació experta de primera mà provinent de Jordi Camp, Eva Flo i Ana Sabatés (ICM-CSIC), Enric Ballesteros (CEAB-CSIC) i Cristina Linares (UB), que han ajudat a l'hora de recollir documentació i/o han compartit dades i idees que encara no han estat publicades. Les figures d'aquest capítol han estat adaptades de treballs publicats recentment, per a la qual cosa s'ha comptat amb l'inestimable ajut dels autors Diego Macías, Eduard Serrano, Ana Sabatés, Antonio Canepa, Verónica Fuentes i Marta Coll.

### 11.2. Síntesi de l'evolució de variables fisicoquímiques de les aigües marines

#### 11.2.1. Temperatura i nivell del mar

L'evolució d'aquestes dues variables tan crítiques en relació amb el canvi climàtic es descriu a l'apartat 4.7 del TICCC, on es proporcionen dades, sobretot, de la valuosa sèrie temporal de l'Estartit. En aquesta estació, gràcies a la dedicació de Josep Pascual, disposem de dades de la temperatura de l'aigua del mar a diferents profunditats des del 1974 i del nivell del mar des del 1990. En síntesi, aquestes dades mostren augments de temperatura d'entre 0,3°C i 0,19°C per decenni en els primers 50 m i a 80 m de profunditat, respectivament, i augments del nivell del mar de 3,9 cm de mitjana per decenni. Pel que fa a la pujada de la temperatura de la Mediterrània en general, cal tenir en compte l'existència de certa variabilitat cíclica natural. En un treball recent s'ha trobat força relació entre l'evolució de la temperatura i l'oscil·lació multidecennal de l'Atlàntic (AMO; Macías *et al.*, 2013). Segons aquest estudi, tan sols el 42 %, aproximadament, de l'escalfament observat en els darrers decennis hauria estat causat per motius antropogènics; la resta vindria modulada per l'AMO. Aquesta observació és important pel que fa a projeccions futures que mostren possibles atenuacions en l'escalfament i posteriors magnificacions causades per les oscil·lacions de l'AMO (figura 11.1).

#### 11.2.2. Salinitat

A escala global, des de meitat del segle xx, les regions dels oceans amb més influència de les precipitacions n'han vist reduïda la salinitat, mentre que hi ha augmentat a les zones dominades per processos d'evaporació (Skirris *et al.*, 2014; Durack, 2015). A l'oceà Pacífic, per exemple, la salinitat ha disminuït, mentre que a l'oceà Atlàntic s'ha incrementat tant en superfície com en els primers 1.000 m de fondària. Durant aquest mateix període, la mar Mediterrània s'ha salinitzat progressivament, sobretot en les zones fondes: per sota dels 1.000 m, la mar Mediterrània és, de tots els oceans, on la salinitat ha augmentat de manera més dràstica (> 0,05 PSS del 1950 al 2010 entre 1.000 i 1.500 m; Borghini *et al.*, 2014; Skirris *et al.*, 2014). En aigües superficials, aquesta tendència cap a la salinització no és tan clara i evident com en les zones fondes (Vargas-Yáñez *et al.*, 2010, 2012). En aquests increments de salinitat de la

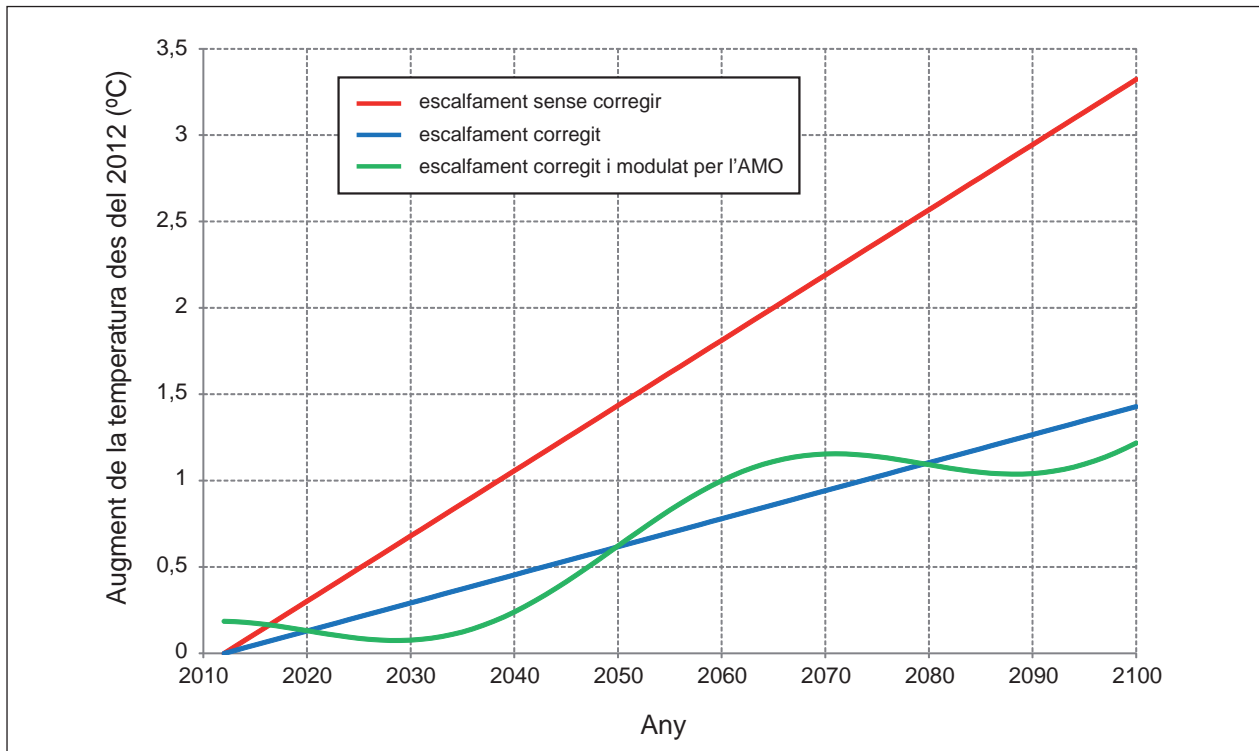


FIGURA 11.1. Projeccions en l'evolució de la temperatura superficial marina segons tres escenaris: en vermell, escalfament extrapolat linealment sobre la base de l'escalfament dels darrers vint-i-cinc anys; en blau, escalfament extrapolat linealment assumint que només, aproximadament, el 42 % de l'escalfament dels darrers vint-i-cinc anys és antropogènic; en verd, escalfament tenint en compte la dependència de la temperatura amb l'AMO.

Mediterrània tenen un paper fonamental processos com els esdeveniments hivernals de formació d'aigua profunda que transfereixen salinitat de la superfície cap al fons (Borghini *et al.*, 2014), una disminució general de les precipitacions, l'augment de l'evaporació i la minva del cabal dels rius que hi desemboquen per causa de la construcció de preses i embassaments (Simó *et al.*, 2010). Pel que fa a projeccions de futur, per bé que en general per a la Mediterrània s'apunta a un increment continuat de la salinitat, la zona de la mar catalana és una excepció on, segons quina sigui la simulació, es projecten increments o disminucions de la salinitat (Adloff *et al.*, 2015).

### 11.2.3. pH

Tal com es va introduir al SICCC (Simó *et al.*, 2010), l'augment del contingut de  $\text{CO}_2$  a l'atmosfera a causa de les activitats antròpiques, a banda d'escalfar el planeta a través de l'efecte d'hivernacle, també provoca una acidificació progressiva de les aigües dels mars i els oceans. Aquesta acidificació (o disminució del pH) ha estat causada pel fet que part d'aquest excés de  $\text{CO}_2$  atmosfèric es dissol

en l'aigua de mar, on participa en una sèrie de reaccions químiques del sistema carbònic-carbonat. Des de la revolució industrial, hom calcula que el pH de la superfície dels oceans ja ha disminuït en 0,1 unitat. A finals d'aquest segle, i segons les quantitats de combustibles fòssils que es cremin, aquest pH podria disminuir entre 0,1 i 0,4 unitats més (Gattuso *et al.*, 2015). Els possibles efectes d'aquesta acidificació en els organismes marins són molt diversos i variats. Hi ha un gran consens científic que, en el cas dels organismes amb l'esquelet o la closca de carbonat càlcic, com les algues coral·linals, els mol·luscs (musclos, cloïsses, caragols), els crustacis (llagostes, crancs) o molts coralls, l'acidificació en perjudicarà el creixement (Kroeker *et al.*, 2010).

Pel que fa a mesures instrumentals de pH, hi ha algunes sèries temporals a mar oberta que mostren aquesta progressiva acidificació, per exemple a les illes Canàries, a les illes Bermudes o a Hawaii (Bates *et al.*, 2014). En zones costaneres, no obstant això, el pH també es veu modulad per altres paràmetres i, en general, presenta una gran

variabilitat, cosa que fa més difícil de detectar l'esperada baixada progressiva del pH. A la Mediterrània, a les sèries instrumentals existents encara no es pot detectar una tendència clara d'acidificació. A les illes Medes i a Blanes, per exemple, els mesuraments que realitza periòdicament l'Institut de Ciències del Mar no mostren encara cap tendència clara que es distingeixi del típic cicle anual (Pelejero *et al.*, en preparació). Existeixen, no obstant això, algunes estimacions pel que fa al grau d'acidificació que està tenint lloc a la Mediterrània. Touratier i Goyet (2011) van suggerir que l'acidificació s'esdevenia més ràpidament en aquesta mar semitancada que als oceans globals; el pH hauria baixat ja en 0,14 unitats des de la revolució industrial. Un treball més recent, en canvi, indica que, tot i que la penetració de CO<sub>2</sub> antropogènic a la Mediterrània és més ràpida que a l'oceà global, aquesta no es tradueix en una acidificació més intensa (Palmiéri *et al.*, 2015). Sembla que l'elevada salinitat i alcalinitat de les aigües de la Mediterrània ajuden a absorbir més CO<sub>2</sub>, però també el neutralitzen amb més eficàcia.

#### 11.2.4. Nutrients

En conjunt, la Mediterrània és una mar amb tendència a l'oligotrofia. L'època de l'any en què hi ha més empobriment en nutrients (entre final de la primavera i principi de la tardor) s'allargarà a causa del progressiu enfortiment de l'estratificació per escalfament (Calvo *et al.*, 2011). Al litoral, tanmateix, la tendència és una altra perquè els efectes antròpics directes hi són més importants que els climàtics. La població de la regió costanera no ha deixat d'augmentar, però l'aprofitament intensiu de les aigües continentals ha fet decreixer els cabals dels rius i els ha regularitzat. Les crescudes amb descàrrega a la mar, les quals arrossegaven enormes quantitats de nutrients, són molt menys habituals. A més, la descàrrega és menys energètica i la influència queda més restringida a prop de la costa. Tot i això, no hi ha evidència que el litoral català s'estigui eutrofitzant. El fosfat en les aigües continentals ha disminuït progressivament des del canvi en la composició dels detergents. L'ús del nitrat i d'altres formes de nitrogen com ara els adobs agrícoles ha augmentat, però les tècniques de reg localitzat i la regulació de l'ús de purins ha aturat l'increment de la concentració d'aquest element en les aigües continentals. A més, la construcció

d'emissaris submarins ha permès d'enviar moltes aigües de depuració enllà de la costa, per sota de la termoclina, la qual cosa ha esmorteït l'efecte dels abocaments de nutrients en el litoral. El resultat de totes aquestes actuacions és que les concentracions de nitrat, amoni i silicat en les aigües litorals no mostren cap tendència significativa ni a l'alça ni a la baixa durant els últims vint-i-cinc anys en el conjunt del litoral (Flo *et al.*, 2010), mentre que les concentracions de fosfat mostren una tendència a la baixa (E. Flo, com. pers.). Val a dir, però, que les aigües confinades per ports, espigons i altres estructures artificials sí que afavoreixen la concentració local de nutrients perquè impedeixen la renovació de l'aigua i l'efecte de dilució que hi permet.

#### 11.2.5. Corrents marins i barreja vertical

Tal com s'observa i es preveu a escala global, la columna d'aigua de la mar Mediterrània també presenta una tendència cap a una estratificació més significant (Calvo *et al.*, 2011; Herrmann *et al.*, 2014; Skliris, 2014). Això es deu a la pujada de la temperatura de l'aigua i, per tant, a la disminució de la densitat. Malgrat que, com hem indicat, la salinitat també té una tendència a augmentar i, per tant, a contrarestar en part l'efecte de la temperatura en el canvi de la densitat de l'aigua, sembla que es manté una certa tendència cap a una estratificació més gran. D'altra banda, aquests canvis en l'estratificació estan relacionats estretament amb la circulació termohalina de la mar Mediterrània. Aquesta circulació, que s'inicia amb la formació d'aigua profunda en determinades conques, ha experimentat canvis importants en els darrers decennis. Concretament, la conca de formació de les aigües més profundes a la Mediterrània oriental es va desplaçar, cap als anys noranta, de la mar Adriàtica a la mar Egea, la qual cosa va afectar en els anys següents els gradients de salinitat en fondària de tota la Mediterrània (Madron *et al.*, 2011). Més recentment, després dels hiverns del 2004-2005 i del 2005-2006, durant els quals hi va haver una formació molt important d'aigües profundes al golf de Lleó, les propietats de les aigües profundes de la Mediterrània occidental han canviat de manera significativa i han guanyat densitat (Zunino *et al.*, 2012). Sembla que, per tant, la circulació termohalina de la mar Mediterrània no ha estat estacionària pel que fa als darrers decennis (Hassoun *et al.*, 2015). La relació entre aquests canvis en la

circulació i el canvi climàtic no és clara, ni tampoc les possibles tendències futures, dos aspectes essencials que caldrà estudiar a fons.

A la Mediterrània nord-occidental, la formació d'aigua profunda habitual als hiverns sovint té lloc en forma de cascades submarines d'aigües denses que comporten la transferència ràpida i massiva de matèria i d'energia cap a l'oceà profund (Puig *et al.*, 2013). Aquest procés recurrent, que es repeteix cada cinc-deu anys, oxigena i fertilitza les aigües profundes i té un impacte important en les comunitats biològiques que hi viuen. Això s'ha vist, per exemple, en el cas de la preuada gamba rosada (*Aristeus antennatus*; Company *et al.*, 2008): l'arribada de nutrients als 1.000 metres per mitjà del fenomen de cascades és important per al creixement durant la fase juvenil. Hom ha vist que els episodis de formació de cascades submarines es tradueixen en un col·lapse temporal de la pesca d'aquesta espècie, la qual triga a recuperar-se de tres a cinc anys (Company *et al.*, 2008). També hi ha indicacions d'efectes d'aquests processos de formació d'aigües profundes en la dinàmica del plàncton i en els nutrients en els ecosistemes costaners (Arín *et al.*, 2013) Aquests episodis es desencadenen, sobretot, durant hiverns freds i secs amb poca descàrrega fluvial, que afavoreixen l'enfonsament d'aigües denses. Duen, per tant, un clar component climàtic. No obstant això, l'evolució amb el canvi climàtic no és del tot clara.

### 11.3. Vulnerabilitat de comunitats mediterrànies d'elevada biodiversitat

#### 11.3.1. Coral·ligen

La comunitat del coral·ligen, exclusiva de la Mediterrània, és constituïda principalment per l'acumulació d'algues calcàries incrustants esciòfiles (que creixen en condicions de poca llum), i que formen un substrat dur de 20 a 120 metres de profunditat, especialment en el nivell circalitoral (Gili i Ros, 1984; Ballesteros, 2006). Aquestes concrecions algals recobreixen parets verticals o gairebé, voladissos o substrats horitzontals de graves organògenes o grapissar, amb gruixos que van de pocs centímetres a tres o quatre metres i que tenen una estructura complexa, la qual ha estat comparada amb la pasta fullada (les capes successives de creixement de les

algues) i amb un formatge d'Emmental (per la quantitat de cavitats que la solquen). Sobre aquesta estructura creixen algues esciòfiles toves, invertebrats sèssils suspensívors, incrustants o no, i s'hi mouen espècies vàgils que hi troben aliment i recer. Dins l'estructura viuen altres espècies, algunes de les quals la perforen, amb la qual cosa s'estableix un equilibri inestable entre el creixement de l'estructura, causat per les algues i els invertebrats incrustants, i la destrucció, causada pels organismes perforadors, pels temporals ocasionalment forts i pel pes de la massa del coral·ligen.

La biodiversitat de la comunitat coral·ligena és molt alta i s'hi han identificat fins a 1.666 espècies de cianòfits, algues, protists, invertebrats i peixos (Ballesteros, 2006; Simó *et al.*, 2010), encara que es tracta d'una estimació conservadora. Un bon nombre d'aquestes espècies es poden considerar en perill a causa del valor gastronòmic o decoratiu i n'hi ha que són objecte de diverses mesures de protecció. Cal esmentar l'herbacol (*Laminaria rodriguezii*), el corall vermell (*Corallium rubrum*), diverses espècies de gorgònies, els mol·luscs (*Lithophaga lithophaga*, *Pinna* spp.), els crustacis (com ara *Scyllarides latus*) i diverses espècies de peixos. L'estructura complexa del coral·ligen, de la massa de concrecions i, alhora, dels organismes que s'hi instal·len a sobre (com ara les gorgònies i altres espècies que sovint constitueixen «boscos» amb diferents «estrats»), i l'elevada diversitat específica constitueixen una rica xarxa d'interrelacions ecològiques, les quals comencen per l'epibiosi, que és la generadora de la comunitat. Tant l'epibiosi, que provoca competència per l'espai físic, per la llum (en el cas de les algues) i pel volum d'aigua per filtrar (en el dels suspensívors), com els diversos sistemes de defensa antidepredadors de què gaudeixen moltes espècies, han originat nombrosos exemples de guerra química mitjançant la producció de substàncies actives. Altres interrelacions ecològiques entre espècies del coral·ligen es troben dins dels fenòmens de simbiosi, parasitisme, mutualisme i comensalisme (Ballesteros, 2006).

Malgrat això, el coral·ligen és, també, una comunitat molt vulnerable: els impactes de la pesca de ròssec i d'altres arts, de l'ancoratge d'embarcacions i d'altres tipus de destrucció mecànica com el «trepig»

dels escafandristes, l'efecte de diferents tipus de contaminants i de les espècies exòtiques invasores són altres tants efectes de degradació del coralligen (Ballesteros, 2006; Piazzini *et al.*, 2012).

Però l'impacte més important està relacionat amb el canvi climàtic i amb els episodis d'escalfament de les aigües superficials i subsuperficials perllongats més enllà del que és comú en el pas de l'època estival a l'autumnal, amb el retard consegüent de la barreja vertical de les aigües i el trencament de la termoclina. Això produeix mortaldats, especialment de les espècies d'invertebrats suspensívors. No repetirem aquí allò que ja es va comentar de manera relativament extensa en el SICCC: la situació no ha canviat, per bé que s'han fet nous estudis i hi ha noves dades, en especial de les conseqüències d'aquests episodis i de la velocitat de recuperació dels fons afectats pels episodis de morts en massa (Cebrian *et al.*, 2011; Crisci *et al.*, 2011; Ponti *et al.*, 2014; Pairaud *et al.*, 2014; Di Camillo i Cerrano, 2015; etc.). Aquests, en resum, indiquen la lenta recuperació dels «boscors» de suspensívors (especialment, de gorgònies), fet que té efectes importants en la capacitat reproductiva i en els primers estadis de vida d'aquests organismes (Kipson *et al.*, 2012; Arizmendi-Mejía *et al.*, 2015), cosa que es tradueix en una encara més baixa taxa de reclutament i d'altres conseqüències derivades de l'alteració, a vegades molt dràstica, de l'estructura de la comunitat, amb canvis que van des de la dominància d'espècies estructurals i longeves en les situacions no impactades fins a espècies de creixement ràpid amb menys complexitat estructural (Ponti *et al.*, 2014; Di Camillo i Cerrano, 2015). Cal esmentar aquí els efectes dels episodis d'escalfament notable en *Cladocora caespitosa*, l'únic corall escleractiniari amb algues simbiotes i constructor d'esculls a la Mediterrània, els quals han estat ben estudiats a l'arxipèlag dels Columbrets (Kersting i Linares, 2012). Un estudi de més d'una desena d'anys (Kersting *et al.*, 2013) posa de manifest l'estreta correlació entre els episodis de mortaldat d'aquest corall i els augments de la temperatura superficial de l'aigua, amb necrosi dels teixits tous, els quals es van fer més importants després de l'episodi d'escalfament excepcional de l'estiu de 2003, i mantenint, també, la sospita que altres factors d'estrès, com ara les algues invasores que

afecten aquesta espècie (Kersting *et al.*, 2014), poden tenir-hi un efecte sinèrgic.

### 11.3.2. Alguers de Posidonia

*Posidonia oceanica*, l'altina o alga, és una fanerògama marina, endèmica de la Mediterrània que forma alguers en l'estatge infralitoral, sobre fons sorrencs i a profunditats que van des de pràcticament la superfície de l'aigua fins a una quarantena de metres, segons quina sigui la transparència de les aigües. Altres herbes marines mediterrànies, com *Cymodocea nodosa*, formen, així mateix, alguers submergits, més esparsos i amb funcions ecosistèmiques no tan notables com les de *Posidonia* (Larkum *et al.*, 2006; Boudouresque i Meinesz, 1982).

*Posidonia* té arrels, rizomes que creixen verticalment o horitzontal sobre el fons, fulles acintades disposades en feixos i floreix i fructifica. La xarxa de rizomes i el sediment i la matèria orgànica que retenen constitueixen un substrat organogen (la mata) sobre el qual s'instal·len organismes més propis dels fons durs que dels tous. A més d'aquesta modificació del medi, l'herbei ofereix refugi a peixos i a altres animals alhora que és un suport per a organismes epibionts molt diversos. L'alguer de *P. oceanica* capta partícules en suspensió en l'aigua, estabilitza els sediments i protegeix així el litoral. És un embornal de carboni (TICCC, apartat 3.3) i del reciclatge de nutrients. Molts animals hi fresen i hi troben aliment, i l'excés de producció (els aproximadament 400 g C m<sup>-2</sup> any<sup>-1</sup> que produeix l'herbei estan constituïts per materials difícilment degradables pels organismes marins, la qual cosa vol dir que tenen una vida molt llarga al medi) és exportat a la part emergida del litoral (on forma amuntegaments ben característics en forma de «fullaraca» acumulada a les platges, els quals serveixen com a aliment i recer per als descomponedors del litoral emergit) i a les zones més profundes, sovint molt pregones, on constitueix una entrada alimentària no gens negligible en un ambient fosc i mancat de producció primària.

El paper ecològic de l'alguer de *P. oceanica* és, doncs, força important, però a tota la Mediterrània els alguers estan sotmesos a amenaces que els degraden de manera diversa i fan que es tro-



bin en regressió (per això mateix, l'espècie està protegida, si més no sobre el paper, en els països de tota la conca). Algunes d'aquestes amenaces provenen de la dinàmica natural del litoral: els temporals forts poden descalçar les parts més superficials de l'alguer; les avingudes dels rius, amb aportacions massives de sediments, poden soterrar àrees extensíssimes; oscil·lacions naturals en l'abundància dels herbívors o dels depredadors de les espècies epibionts i de les que roseguen fulles poden tenir una incidència notable en les variacions temporals en l'extensió i la salut de l'alguer. Les mateixes variacions en el nivell del mar al llarg dels temps geològics més recents, causades pels moviments tel·lúrics ràpids o pels canvis climàtics lents, que influeixen en la proporció relativa d'aigua líquida i sòlida, han deixat al descobert, o han sepultat, alternativament, alguers d'aquesta espècie.

Però l'alguer de *P. oceanica* també és una de les comunitats marines més amenaçades per les activitats humanes. Cal esmentar la modificació de les aportacions sedimentàries (per la construcció d'estructures litorals, per la reducció dels cabals fluvials, per la «regeneració» de platges, etc.), les quals poden colgar o descalçar l'alguer. Així mateix, el «trepig» de persones i de les embarcacions en els alguers més superficials i l'efecte de l'ancoratge de les embarcacions o del pas de xarxes de ròssec sobre els més profunds és particularment negatiu. Cal afegir-hi la contaminació de les aigües litorals: *P. oceanica* és un bon acumulador de tota classe de substàncies, moltes de les quals són tòxiques. L'augment de la temperatura de l'aigua i la pujada del nivell del mar, entre altres modificacions ambientals causades pel canvi climàtic, podrien tenir una influència negativa en aquesta espècie d'herba marina.

Segons el tipus de litoral, la pujada del nivell del mar afectarà més o menys l'alguer de *Posidonia*; ja hem esmentat que el límit inferior és determinat pel grau d'il·luminació, que es reduirà si l'alçada de la columna d'aigua s'incrementa. Pel que fa al nivell superior, si el substrat envaït per les aigües és adient (sorrals, marjals, etc.), és raonable pensar que la praderia els anirà ocupant, fet que compensarà, en certa manera, les pèrdues en profunditat. Però si no ho és (penya-segats,

obra viva, fangars, etc.), aquest creixement que segueix terra endins la reculada del litoral no ocorrerà i hi haurà una pèrdua de superfície de l'alguer. En qualsevol cas, el ritme de creixement horitzontal de l'alguer és molt lent (hi ha clarianes en alguers del litoral francès, causades per bombardejos durant la Segona Guerra Mundial, que encara no s'han tancat), previsiblement més que el de pujada del nivell del mar.

No obstant això, la pujada del nivell del mar no és l'únic efecte del canvi climàtic. Cal considerar, entre d'altres, l'augment de la temperatura i l'acidificació de l'aigua de la mar. Per bé que, d'una manera general, la pujada de les temperatures pot tenir per a *Posidonia* el mateix efecte que per a altres espècies pel que fa al desplaçament i l'ocupació d'espais anteriorment vedats per haver estat massa freds i la mort i abandonament de fons excessivament caldejats (Marbà i Duarte, 2010), cal recordar que la Mediterrània és una mar tancada i que aquesta eventual migració cap al nord quedaria frenada per la barrera continental (Burrows *et al.*, 2011).

Així mateix, l'espècie *P. oceanica* està subjecta a canvis demogràfics i metabòlics directament relacionats amb l'augment de temperatura. Les projeccions que s'han fet pel que fa a l'augment gradual previst de la temperatura (que arribarà a superar els 28 °C de l'aigua superficial, que és la temperatura crítica per sobre de la qual la mortalitat de *Posidonia* augmenta molt), així com pel que fa a l'augment de la freqüència dels episodis d'increment extrem de la temperatura (onades de calor), indiquen que a mitjan segle XXI (el 2049, deu anys amunt, deu anys avall) l'alguer de *P. oceanica* pot estar funcionalment extingit (es considera que això s'esdevé quan la densitat dels feixos foliars baixa per sota del 10 % de l'actual; Jordà *et al.*, 2012).

Aquests autors plantegen diferents escenaris futurs (amb escalfament o sense, amb les pressions antropogèniques esmentades més amunt o sense) i en qualsevol dels escenaris, els alguers de *Posidonia* assoleixen aquesta densitat incompatible amb la supervivència abans del segle XXI.

Així mateix, l'augment de la temperatura altera la taxa de mineralització del carboni i del nitrogen (Pedersen *et al.*, 2011): s'incrementa entre 15 i

25 °C, però es redueix per sobre de 25 °C. El resultat és que el paper d'embornal de CO<sub>2</sub> de l'herbei s'inverteix a temperatures altes, i l'alliberament de diòxid de carboni augmenta.

Encara cal considerar que podria ser que alguns macròfits que competeixen amb *P. oceanica*, principalment espècies al·lòctones d'origen tropical i subtropical, tinguessin avantatges en detriment de l'herba autòctona en un escenari d'escalfament com el previst. A més a més, l'altina té poca capacitat d'adaptació i poca resiliència, en consonància amb unes taxes mutacional i evolutiva baixes i amb un creixement molt lent (1 cm any<sup>-1</sup>) i una baixíssima diversitat genètica. De fet, els herbeis són clons estesos sobre grans superfícies.

#### 11.4. Canvis en relació amb l'espècie

##### 11.4.1. Algues

Al capítol sobre els ecosistemes marins del SICCC (Simó *et al.*, 2010) vam dedicar un apartat als productors primaris del plàncton, perquè aquests organismes són responsables d'aproximadament la meitat de la producció primària (fixació de carboni) de la Terra i són la base de la xarxa tròfica de l'ecosistema pelàgic. Aquest apartat sintetitza breument les noves dades sobre tendències en la productivitat primària, la dinàmica de les algues microscòpiques i alguns apunts sobre macroalgues en relació amb el canvi climàtic. Pel que fa al cas particular de les algues dinoflagel·lades tòxiques, aquest capítol hi dedica específicament un apartat (11.5.2).

Com s'ha esmentat anteriorment, una conseqüència esperable de l'escalfament global és l'augment de l'estratificació de les aigües i la disminució de la barreja vertical. Això hauria d'anar acompanyat d'una reducció de la productivitat primària. En zones interiors de la Mediterrània, estimacions de clorofil·la basades en imatges de satèl·lit apunten cap a aquesta direcció (Barale *et al.*, 2008). No obstant això, en zones concretes de la Mediterrània, com per exemple a la mar Lígur, hom ha observat la tendència oposada (Marty i Chiavérini, 2010) i ha suggerit que la productivitat primària de la Mediterrània nord-occidental més aviat s'està incrementant. De fet, en aquest treball es relaciona aquest augment amb la intensitat més

força dels episodis de barreja profunda esdevinguts entre el 2003 i el 2006 (comentats a l'apartat 11.2.5) i amb la més gran disponibilitat de nutrients que se'n deriva. Resultats recents de models també apunten cap a un increment de la clorofil·la pel que fa al futur, sobretot associat als períodes de barreja vertical típics de l'hivern i de principi de la primavera (Herrmann *et al.*, 2014). Tanmateix, segons aquest estudi, l'augment de la clorofil·la no es traduiria en un increment de la biomassa de fitoplàncton. La productivitat primària bruta (biomassa total sintetitzada) sí que creixeria, sobretot a causa de l'augment de temperatura, però la producció primària neta, un cop restada la biomassa consumida en processos catabòlics (respiració), es mantindria sense canvis significatius. Altres treballs basats en models apunten cap a aquesta mateixa direcció (Lazarri *et al.*, 2014).

Pel que fa a organismes concrets, tal com es comenta al SICCC (Simó *et al.*, 2010) i projecten els models (Herrmann *et al.*, 2014), les condicions hidrodinàmiques futures haurien d'afavorir les espècies del fitoplàncton més petites, sobretot les del picofitoplàncton, les quals haurien de proliferar amb més abundància, sobretot durant el període d'estratificació de l'estiu i la tardor. No obstant això, dins d'aquest grup les poblacions de *Synechococcus* i *Prochlorococcus*, els bacteris marins que es comporten ecològicament com les algues, encara no manifesten canvis significatius, probablement perquè tenen una enorme diversitat genètica (Mella-Flores *et al.*, 2011). Pel que fa a les algues cocolitoforals, hom esperaria que, a causa de la vulnerabilitat de les estructures calcàries, es veiessin afectades per l'acidificació. Encara que hi ha un gran debat pel que fa a la repercussió real (Meyer i Riebesell, 2015), un treball recent basat en trampes de sediment mostra que durant els darrers dotze anys el gruix dels cocòlits (closquetes calcàries) d'aquestes algues ha disminuït progressivament, potser a causa de l'acidificació (Meier *et al.*, 2014).

Les macroalgues de la Mediterrània presenten una alta diversitat. Dins d'aquest grup s'han descrit importants davallades en determinades poblacions, com per exemple en les fucals (Thibaut *et al.*, 2005), que són importants espècies estructurals, formadores d'hàbitat per a una bona quantitat d'altres organismes. Algunes fucals, com per exemple

les algues endèmiques del gènere *Cystoseira*, són vulnerables a diversos factors de pressió, com ara l'augment de turbulència de l'aigua, la contaminació, la competència amb altres espècies (com ara els mol·luscs), la depredació (equinoderms), i les interaccions entre elles. Entre tanta complexitat es fa difícil discernir el possible efecte del canvi climàtic, encara que és raonable suposar, tanmateix, que l'exposició a totes aquestes pressions incrementa la vulnerabilitat al canvi climàtic d'aquests organismes. Durant el violent temporal del dia de Sant Esteve del 2008, en algunes zones de la costa del Montgrí s'hi van produir mortalitats de fins al 80 %, cosa que evidenciava la importància dels esdeveniments catastròfics en el manteniment d'aquestes poblacions de creixement lent (Navarro *et al.*, 2011).

D'altra banda, la progressiva acidificació dels oceans (vegeu l'apartat 11.2.4) podria afectar negativament el creixement de les algues incrustants, les quals formen estructures de calcita rica en magnesi especialment solubles. Això s'observa, per exemple, en zones afectades per emanacions de CO<sub>2</sub> d'origen volcànic, les quals presenten gradients naturals de pH que permeten realitzar observacions de canvis poblacionals *in situ*. Als voltants de l'illa d'Ischia, al sud d'Itàlia, s'ha constatat l'afectació de la disminució del pH en el desenvolupament de les algues incrustants (Porzio *et al.*, 2011), efecte semblant a l'observat als Columbrets (Linares *et al.*, 2015). Per contra, la major part de macroalgues no incrustants sembla que no es veuran afectades de manera important per aquest fenomen o, fins i tot, es veuran afavorides (Linares *et al.*, 2015).

#### 11.4.2. Invertebrats

Tot complementant el que s'ha esmentat a l'apartat 11.3.1 en relació amb el coral·ligen i els episodis de mortalitat massiva associats amb l'escalfament, a continuació sintetitzem algunes evidències dels efectes del canvi climàtic en espècies concretes d'invertebrats. S'han estudiat, per exemple, els efectes de l'escalfament en coralls temperats, i un dels patrons que s'ha trobat és que les espècies que viuen associades amb simbiotes (zooxantel·les) són més sensibles a l'augment de la temperatura (Caroselli i Gofredo, 2014). Aquest patró, observat, per exemple, tot comparant els coralls *Leptopsammia pruvoti* (sense simbiotes) i *Balanophyllia europaea* (amb simbiotes), sembla

que es deu a balanços energètics. L'escalfament dificultaria la fotosíntesi de les zooxantel·les i n'inhibiria el creixement. Altres espècies es veuen afavorides per l'escalfament, com és el cas d'*Oculina patagonica*, que, curiosament, presenta simbiotes. Un estudi recent al llarg de la costa catalana ha constatat la ràpida expansió d'aquesta espècie cap al nord durant els últims vint anys, a una velocitat de 22 km/any (figura 11.2; Serrano *et al.*, 2013). Aquesta és l'expansió més ràpida descrita fins ara en els coralls. Una de les causes principals d'aquesta expansió sembla que és la pujada de les temperatures i la consegüent extensió de l'època favorable per al creixement. Cal esperar, tanmateix, que a partir de determinats llindars de temperatura aquesta espècie es vegi perjudicada (Rodolfo-Metalpa *et al.*, 2014), tal com passa amb els altres tipus de coralls de la mar Mediterrània (Kersting *et al.*, 2013).

Uns altres invertebrats emblemàtics del litoral mediterrani són les gorgònies, molt vulnerables també al canvi climàtic. Un estudi recent ha posat de manifest la importància de l'historial tèrmic en la vulnerabilitat a l'escalfament regional d'aquestes espècies (Linares *et al.*, 2013). És el cas de la gorgònia blanca (*Eunicella singularis*), ja que les poblacions menorquines d'aquesta espècie, que viuen en un ambient més càlid, resisteixen millor l'escalfament que les poblacions de les illes Medes. Per a aquesta espècie, que és l'única gorgònia amb simbiotes de la Mediterrània, un trasbals en els balanços energètics associats amb autotròfia (fotosíntesi a través dels simbiotes) i heterotròfia (ingesta de zooplàncton) n'explicarien, en part, la vulnerabilitat a l'escalfament (Coma *et al.*, 2015). En el cas del corall vermell (*C. rubrum*) les poblacions més superficials toleren millor l'escalfament que les que viuen en fondària (Haguenaer *et al.*, 2013).

Pel que fa a altres invertebrats, com ara els mol·luscs i els crustacis, una evidència d'efectes de l'escalfament de les aigües és la proliferació d'espècies exòtiques, tant lessepsianes (procedents de la mar Roja) com introduïdes accidentalment amb aigües de llast o activitats d'aqüicultura, que acostumen a ser termòfiles. D'altra banda, de manera similar al que s'ha descrit en referència a la zona del golf de Thermaikos, a Grècia (Michaelidis *et al.*, 2014), l'escalfament progressiu de les aigües po-

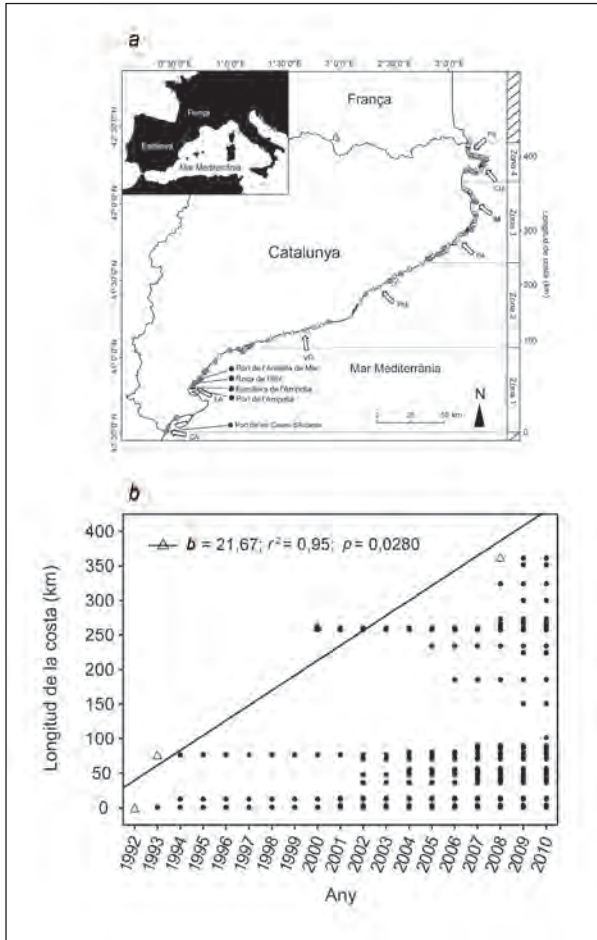


FIGURA 11.2. a) Zones al llarg de la costa catalana on es duu a terme el seguiment d'*O. patagonica*, i b) avistaments d'aquesta espècie al llarg del temps, en funció de la distància des de l'extrem del sud.

Font: Adaptat de Serrano *et al.*, 2013.

dria agreujar els episodis recurrents de calor que perjudiquen la cria del musclo (*Mytilus galloprovincialis*) al delta de l'Ebre. L'estiu del 2015, les temperatures elevades van acabar amb la totalitat de la cria de musclo a la badia dels Alfacs i amb una part de la cria de la punta del Fangar. Es pot trobar més informació sobre impactes del canvi climàtic en les pesqueres de mol·luscs al capítol 13 (apartat 13.2.1) d'aquest INFORME. Cebrian *et al.* (2011) han constatat mortalitats causades per l'escalfament en determinades espècies d'esponges. Pel que fa a les meduses, en aquest capítol els dediquem un apartat (11.5.1) a causa de l'important impacte social que tenen.

A banda de l'escalfament, l'acidificació marina és també una pressió ambiental amb possibles efectes en els invertebrats, sobretot els que construeixen un esquelet o una closca calcària. De moment,

les evidències d'efectes en organismes de la Mediterrània nord-occidental són experimentals i han estat obtingudes en estudis realitzats en aquaris o en zones afectades per l'emanació de CO<sub>2</sub> d'origen volcànic. En general, la major part d'aquests treballs apunta cap a efectes perjudicials, de reducció de la calcificació, per exemple, en els coralls *Cladocora caespitosa* i *O. patagonica* (Movilla *et al.*, 2012) o en el corall vermell *C. rubrum* (Bramanti *et al.*, 2013). Pel que fa als mol·luscs i crustacis, els efectes de l'acidificació varien força segons l'espècie, però els més afectats serien, sobretot, els estadis larvals (Gazeau *et al.*, 2013; Dissanayake 2014).

#### 11.4.3. Peixos

Tal com es va discutir al SICCC (Simó *et al.*, 2010), en la variabilitat de la ictiofauna no és fàcil discernir els fenòmens associats a factors climàtics dels que estan associats a l'impacte humà directe (per exemple, l'explotació pesquera). Així i tot, la variabilitat climàtica més recent, en correspondència amb l'escalfament global, està canviant els patrons de distribució geogràfica d'espècies a la Mediterrània occidental. Espècies més termòfiles, d'afinitat tropical i subtropical, que abans es trobaven a les costes nord-africanes i del llevant meridional peninsular, avancen progressivament cap a zones septentrionals de la costa catalana i la mar Lígur. Algun autor ha apuntat que la mar Mediterrània podria esdevenir al final de segle un cul de sac per a algunes espècies temperades, ja que la falta de sortides al nord n'impediria la migració cap a latituds més altes i fredes i en provocaria l'extinció (Ben Rais Lasram *et al.*, 2010). En aquest apartat, hom recull alguns trets i troballes importants en relació amb l'efecte del canvi climàtic en algunes espècies concretes, els quals han estat publicats després del SICCC. El capítol 13 adreça amb més profunditat els impactes en la pesca.

Un cas que ja comentàvem al SICCC és el del tallahams (*Pomatomus saltatrix*), que darrerament ha estat descrit amb més detall (Sabatés *et al.*, 2012; Villegas-Hernández *et al.*, 2015). Aquest peix, apreciat per practicants de la pesca esportiva, està augmentant en nombre a les aigües septentrionals de la Mediterrània nord-occidental, probablement perquè les condicions tèrmiques d'aquestes aigües

han superat un llindar que les fa favorables per la reproducció (Sabatés *et al.*, 2012). Les captures de tallahams a la Mediterrània occidental van despuntar, sobretot, cap als anys noranta. Si es comparen les captures a la zona del delta de l'Ebre, que és on avui dia es pesca més aquesta espècie, amb les dels ports del nord de Barcelona, s'observa clarament que aquestes darreres s'incrementen a partir de l'any 2000 (figura 11.3). Aquesta tendència cap al nord és encara més clara quan es normalitza pel nombre de vaixells (Roses i l'Escala, Villegas-Hernández *et al.*, 2015). A més, s'ha observat que el tallahams presenta un estat de salut més bo en aigües septentrionals i que els ovòcits de les femelles del golf de Roses són més grans que els del delta de l'Ebre (Villegas-Hernández *et al.*, 2015). A banda de l'efecte de la temperatura, és probable que la productivitat primària més destacable que

s'observa a la zona del golf de Lleó també afavoreixi aquesta expansió del tallahams cap al nord.

Una altra forta correlació entre poblacions de peixos i clima és la que s'ha trobat entre l'abundància de peixos pelàgics petits com ara la sardina (*Sardina pilchardus*) i el seitó (*Engraulis encrasicolus*) i la fase de l'oscil·lació de la Mediterrània occidental (WeMO, Martín *et al.*, 2012). Durant els períodes amb valors positius de WeMO, els quals s'associen amb baixes temperatures de l'aigua, altes descàrregues dels rius i forta barreja vertical de la columna d'aigua, les captures de sardina i seitó acostumen a ser més importants que durant períodes on aquest índex mostra valors negatius. En relació amb aquestes dues espècies, és important recalcar de nou l'expansió cap al nord d'un altre pelàgic petit, l'alatxa (*Sardinella aurita*), documen-

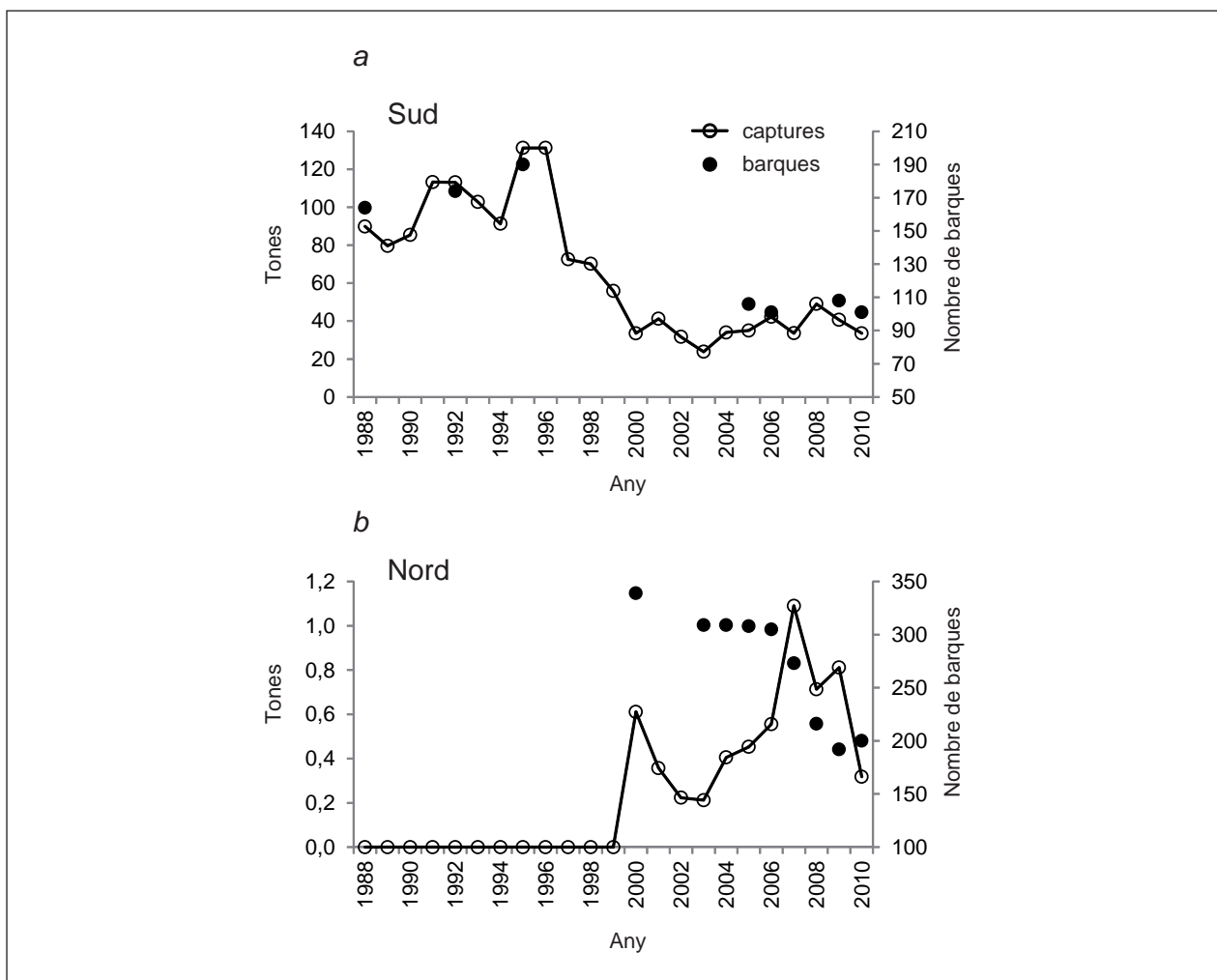


FIGURA 11.3. Captures de tallahams en ports al nord de Barcelona (nord) i al port de Sant Carles de la Ràpita (sud), i nombre de barques involucrades en les captures.

Font: Adaptada de Sabatés *et al.*, 2012.

tada a la Mediterrània nord-occidental (Sabatés *et al.*, 2006), que ja es va esmentar al SICCC. Com apunten Villegas-Hernández *et al.* (2015), el valor comercial de les captures podria minvar si les espècies termòfiles, com ara l'alatxa, incrementen les poblacions en detriment d'espècies temperades més preuades com ara la sardina i el seitó. De fet, tal com es va observar per comparació entre l'estiu del 2003 (excepcionalment càlid) i el del 2004 (temperatures properes a la mitjana), l'alatxa està més adaptada a les altes temperatures que el seitó (Maynou *et al.*, 2014). Com que, a diferència de la sardina, la reproducció d'aquestes dues espècies es duu a terme durant el mateix període de l'any (l'estiu) i totes dues espècies tenen dietes similars, és probable que competeixin pels recursos tròfics, tot i que la distribució més costanera de les larves d'alatxa en relació amb les de seitó podria contribuir a mantenir separades les poblacions de totes dues espècies (Sabatés *et al.*, 2013).

Amb la intenció d'avaluar amb objectivitat la manera com el canvi climàtic modula l'abundància i la diversitat d'espècies termòfiles i temperades, un treball recent ha combinat dades estadístiques de pesqueries, dades de coneixement i percepció dels pescadors i dades pel que fa a la reproducció (Lloret *et al.*, 2015). Aquesta aproximació ha permès constatar, per exemple, que alguns dels casos més clars de modulació climàtica són els del tallahams i de l'alatxa, mencionats anteriorment, però també el de l'espet de boca groga (*Sphyræna viridensis*), la palomida blanca (*Trachinotus ovatus*) i el peix de plata (*Argentina sphyraena*), el qual és una espècie temperada amb tendència a minvar en abundància. Pel que fa a *S. viridensis*, que últimament es troba prou freqüentment a la mar catalana, es creu que l'escalfament global el farà més competitiu que l'espet (*S. sphyraena*), que és l'espècie habitual als Països Catalans (Villegas-Hernández *et al.*, 2014).

Cal mencionar breument el cas dels peixos conill (tacat, *Siganus luridus*, i llis, *S. rivulatus*), dues espècies invasores provinents de la mar Roja (lessepsianes) que estan provocant canvis profunds en l'estructura de les comunitats i el paisatge a causa de l'herbivorisme accentuat (Vergés *et al.*, 2014). Aquestes espècies, molt abundants ja a la Mediterrània oriental, estan expandint l'àrea de

distribució i en el futur podrien arribar a la mar catalana. De fet, ja s'ha documentat l'avistament de dos individus de peix conill tacat al sud de França, a prop de Marsella.

## 11.5. Fenòmens amb impacte socioeconòmic directe

### 11.5.1. Proliferacions de meduses

Les meduses són organismes planctònics gelatinosos abundants a la Mediterrània i a tots els mars del planeta. Es poden acumular en eixams d'elevada densitat que, en determinades condicions, arriben fins al litoral. Com a membres del zooplàncton, tenen importància ecològica perquè són eficients capturadors de petits crustacis i larves de peixos, sobretot. Tanmateix, pel fet que són més conegudes és per les picades que fan a banyistes, pescadors i treballadors de l'aqüicultura i per la presència en xarxes de pesca i turbines, la qual cosa els ha posat l'etiqueta de «problema ambiental» (Calvo *et al.*, 2011).

Al litoral català, la medusa dominant i la que causa més alarma és *Pelagia noctiluca*. Aquesta espècie mostra una àmplia distribució, pot formar eixams de força densitat d'individus i fa una picada tòxica. Com ja apuntava el SICCC, a les aigües de Vilafranca de Mar, a la mar Lígur, les proliferacions de *P. noctiluca* van ser habituals entre el 1775 i el 1987, amb una periodicitat aproximada d'increment cada dotze anys. Dades més recents del mateix lloc, i d'altres del golf de Tunis i de les illes Balears, mostren que aquesta periodicitat s'ha escurçat, és a dir, que la freqüència ha augmentat (Daly Yahia *et al.*, 2010; Bernard *et al.*, 2011). Les dades del Programa de Seguiment de les Meduses a les Platges Catalanes, endegat per l'ACA i l'ICM-CSIC, també mostren una tendència a l'increment, però la durada de la sèrie és encara massa curta per a fer-les concloents (Gili *et al.*, 2010).

Com que són organismes que s'alimenten d'un altre plàncton, la reproducció i el creixement de les meduses es veuen afavorits en zones on la productivitat és més alta; a la mar catalana, això es correspon amb el front de corrents que es forma paral·lelament a la costa en direcció nord-sud, al límit de la plataforma continental (Sabatés *et al.*, 2010). L'increment de les temperatures hivernals

també n'afavoreix la reproducció i la permanència en aigües més superficials de la zona frontal. Si la falta de precipitacions i l'escalfament de l'aigua debiliten el front a principis d'estiu, el vent cap a terra acosta les meduses al litoral i, per tant, a les platges (figura 11.4). Dit d'una altra manera: les condicions que afavoreixen els eixams litorals de meduses i, en particular, els de *P. noctiluca*, són els hiverns suaus, la poca pluviositat, la calor a principis d'estiu, les pressions atmosfèriques elevades i el vent de xaloc o del sud-est (Canepa *et al.*, 2014).

Aquesta relació entre proliferacions de meduses a les platges i condicions climàtiques ja ens indica que aquest és un fenomen potencialment sensible al canvi climàtic. De fet, els treballs de Molinero *et al.* (2005; 2008) ja van proposar que els modes principals de variació del clima de l'Atlàntic expliquen bona part de la variabilitat de les abundàncies de meduses i, en especial, de *P. noctiluca*. Treballs posteriors han mostrat que, efectivament, els modes climàtics que provoquen hiverns suaus, primaveres poc plujoses i estius càlids afavoreixen la formació d'eixams de *P. noctiluca* i la permanència al litoral durant períodes més llargs (Daly Yahia *et al.*, 2010; Rosa *et al.*, 2013). Val a dir, però, que no totes les meduses segueixen els mateixos patrons, i que la diversitat taxonòmica duu associada una diversitat de comportaments en relació amb les condicions climàtiques (Brotz *et al.*, 2012; Condon *et al.*, 2013).

Cal tenir en compte que, a més de la meteorologia i el clima, hi ha altres factors que afavoreixen l'abundància de meduses. La proliferació d'estructures artificials (ports, espigons i trencaones) ofereix nous hàbitats a les meduses amb una fase de creixement bentònica (Duarte *et al.*, 2012). A més, la sobrepesca elimina els peixos que competi-

xen per l'aliment amb les meduses, i la pesca amb arts poc discriminatòries n'elimina els depredadors naturals (tortugues, aus i grans peixos carnívors).

Tot fa preveure, doncs, que l'escalfament progressiu de la Mediterrània nord-occidental i la tropicalització del clima, amb hiverns més càlids i estius més llargs i secs, juntament amb l'acció humana directa en la pesca i en l'estructura de la costa, faran que les meduses que afecten les activitats socioeconòmiques del litoral hi apareguin abans i hi romanguin més temps (Purcell *et al.*, 2012).

### 11.5.2. Proliferacions d'algues tòxiques

Les proliferacions de microalgues nocives o tòxiques (PAN) són un problema ambiental pel risc que signifiquen per a la salut humana i pels efectes que tenen en la qualitat i disponibilitat de productes alimentaris del mar i en l'ús recreatiu de les platges. Hom ha de distingir entre els efectes nocius derivats de la producció de toxines que agredeixen humans i peixos (com ara les procedents de les espècies dels gèneres *Alexandrium*, *Dinophysis*, *Pseudo-nitzschia* i *Ostreopsis*) i els derivats d'acumulacions de biomassa tan altes que desoxigenen l'aigua o, simplement, en canvien el color o l'olor, com passa, per exemple, amb *Noctiluca* o amb les taques produïdes per *Alexandrium taylori* en algunes platges de la costa catalana (Garcés *et al.*, 2002). Les PAN litorals solen ser molt localitzades i, tot i que recurrents, molt difícils de predir. Els episodis poden durar des de dues o tres setmanes fins a dos mesos. En molts casos apareixen preferentment a l'estiu, però no solen tenir una estacionalitat clara i repetida.

Perquè s'esdevingui i s'observi un episodi de PAN, cal que hi hagi una confluència de condicions: la

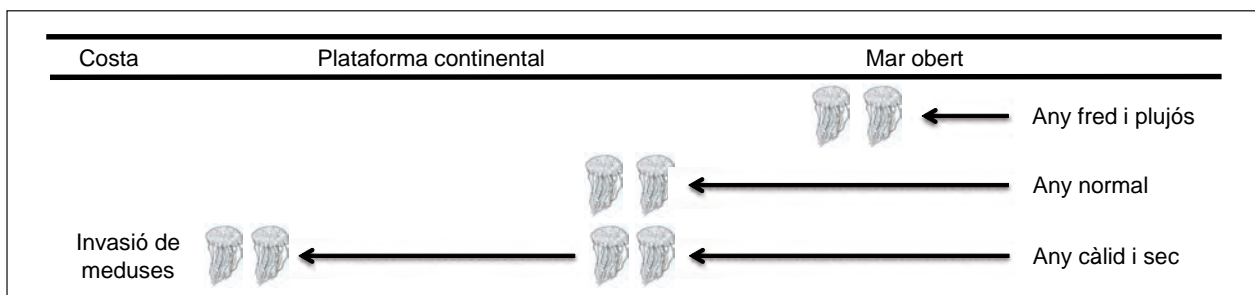


FIGURA 11.4. Proximitat i llunyania de la costa de les proliferacions de *P. noctiluca* en funció de les condicions climàtiques.

Font: Adaptada de Canepa *et al.*, 2014.

presència prèvia d'individus de la microalga, de nutrients i de llum suficients per a una explosió del creixement, cert confinament de les aigües que no en permeti la ràpida dispersió, l'afavoriment d'aquestes espècies en detriment d'altres i la detecció per observadors. Començant pel darrer punt, hi ha un cert consens que els avisos de PAN han augmentat arreu del món durant els últims decennis, però també que això pot haver estat perquè els programes de vigilància i les tècniques de detecció han millorat enormement (Legrand i Casotti, 2010). Pel que fa a la presència d'individus fins i tot quan les condicions són desfavorables, moltes de les espècies que fan PAN són dinoflagel·lades, amb capacitat per a formar cists de resistència que es refugien en els sediments mentre esperen l'arribada de condicions favorables. Les condicions favorables a les PAN són més probables en aigües confinades per estructures portuàries, recreatives o de protecció de la costa, estructures que aturen o desvien els corrents marins predominants, mantenen les poblacions algals agrupades i recullen i concentren els nutrients descarregats per les sortides d'aigua des de terra (Garcés i Camp, 2012). Pensem que, al litoral català, aquestes estructures que poden afavorir les PAN s'han multiplicat per quatre en els últims cinquanta anys: avui hi ha vora quaranta ports en 400 km de costa.

Pel que fa als factors purament climàtics, certament n'hi ha que afavoreixen la formació de PAN. D'una banda, l'escalfament progressiu de l'aigua afavoreix la implantació i recurrència d'algues pròpies d'aigües més càlides, algunes de les quals són tòxiques. És el cas, per exemple, d'*Ostreopsis*, una dinoflagel·lada epifítica productora d'una toxina que irrita pell, ulls i vies respiratòries, la distribució de la qual a les costes mediterrànies sembla que segueix un patró relacionat amb la temperatura, i n'hi ha una abundància màxima al voltant dels 27 °C (Cohu *et al.*, 2013). Malgrat que hi ha altres factors que n'influencien la proliferació, cal pensar que es veu beneficiada per l'escalfament regional (vegeu Vila *et al.*, 2012, en relació amb casos concrets de proliferació d'aquesta alga a la costa catalana).

El fet que el canvi climàtic enforteix l'estratificació i, per tant, fa disminuir la turbulència a prop de la

superfície ha d'afavorir les algues dinoflagel·lades, incloses les tòxiques, en detriment d'altres algues competidores o allargar-ne els episodis de condicions favorables (Moore *et al.*, 2008; Wells *et al.*, 2015). Dependrà, tanmateix, dels canvis que la variació climàtica provoqui en altres variables oceanogràfiques d'influència, com ara la intensitat i la direcció dels corrents o la freqüència d'episodis de fort onatge (Legrand i Casotti, 2010). En tot cas, la confluència de factors climàtics amb altres factors més directament lligats a l'activitat humana, com ara les descàrregues de nutrients i l'enginyeria de la costa, dificulten enormement la predicció de les tendències de les PAN amb el canvi climàtic.

### 11.6. Biodiversitat

La mar Mediterrània és un dels punts calents (*hot spots*) de biodiversitat del planeta, i hostatja una proporció molt més gran d'espècies d'organismes marins (entre el 4 i el 18 %, segons els grups) de la que li pertocaria si en tenim en compte les dimensions (que no arriben a l'1 % dels oceans; al 0,82 % de la superfície, i al 0,32 % del volum). Les causes d'aquesta elevada biodiversitat cal cercar-les en les característiques històriques (la Mediterrània és el que resta de l'antiga mar de Tetis, de la qual conserva algunes espècies relictas; ha rebut en moments diferents espècies atlàntiques, tant d'afinitats temperades-fredes com subtropicals i tropicals, i també migrants lessepsianes, i té un percentatge molt singular d'espècies neoendèmiques), en les característiques hidrogràfiques i en la posició que té com a interfície entre àrees biogeogràfiques que són seu de biomes temperats i tropicals (Coll *et al.*, 2010; Ben Haj i Limam, 2010; etc.).

Això explica que l'endemisme hi sigui elevat (20-30 % d'espècies, en funció dels diferents grups taxonòmics), més que a l'Atlàntic. La resta de la biota mediterrània té un fort component atlàntic (del 55 al 77 %, segons els grups) i uns components pantropical (del 3 al 10 %) i lessepsià (el 5 %) reduïts. Aquestes darreres espècies, que han arribat a la Mediterrània procedents de l'oceà Indopacífic a través del canal de Suez, són les que més probablement augmentaran en nombre (per l'ampliació recent del canal) i en distribució, a causa de la pujada de la temperatura, la qual afavoreix les espècies termòfiles. Cal tenir en compte que a la Mediterrània l'escalfament de les aigües es produ-



eix a una velocitat que és entre el doble i el triple de la de l'oceà global (Vargas-Yáñez *et al.*, 2008). També altres espècies al·lòctones que han arribat per altres vies (introducció d'espècies d'aquari o comercials, entrada associada al transport marítim en aigües de llast o en les incrustacions —*fouling*—, etc.) es podran veure afavorides; això suposarà una disminució relativa de la biota d'origen atlàntic i de l'endèmica.

Hi ha hagut diverses estimacions de l'impacte del canvi climàtic en la biota marina, tant qualitatives (Lejeusne *et al.*, 2010; Poloczanska *et al.*, 2013; Duarte, 2014) com quantitatives (Marbà *et al.*, 2015a, 2015b). Les conclusions són diverses: d'una banda, s'estima que l'impacte ja és elevat (Ros, 2009; Lejeusne *et al.*, 2010; Simó *et al.*, 2010; Calvo *et al.*, 2011; Duarte, 2014); de l'altra, són escasses les aproximacions quantitatives. Una d'aquestes (Marbà *et al.*, 2015a) fa una repassada de la bibliografia que esmenta canvis en la biota atribuïts a l'escalfament, bé a través de l'estudi de sèries temporals de dades, quan n'hi ha, o a conseqüència d'episodis puntuals d'augment extrem de la temperatura (onades de calor). Els canvis que han estat considerats són agrupats en diferents tipus de respostes, tant biològiques com ecològiques, i segons la magnitud: abundància, supervivència, fecunditat, migració, fenologia i creixement. Les dades aplegades per Marbà *et al.* (2015) tenen un clar component geogràfic que és invers als impactes reals: la major part provenen de la Mediterrània nord-occidental, on la tendència a l'increment de la temperatura és més baix que en la meridional i oriental, però que és on hi ha més centres de recerca i que investiguen des de fa més temps. La major part dels impactes de l'escalfament de la Mediterrània (68 %) es tradueixen en variacions en l'abundància poblacional i en la supervivència de les espècies considerades; la migració o el desplaçament de les espècies natives o al·lòctones (principalment lessepsianes) representen un 15 % dels estudis, mentre que els estudis referits a les altres respostes no són tan comuns. Pel que fa a la magnitud de l'impacte tèrmic, un escalfament reduït (50 % de probabilitat d'una anomalia de la temperatura superficial de l'aigua d'1 a 2,5 °C) ja té impacte en la fecunditat, la migració i l'abundància, mentre que calen escalfaments més importants (50 % de probabilitat d'una anomalia de la tem-

peratura superficial de l'aigua de 3 a 4,5 °C) per a causar un impacte en la fenologia i la supervivència. En conjunt, el 50 % dels impactes biològics en la mar Mediterrània tenen lloc si hi ha una anomalia de la temperatura superficial de l'aigua  $\leq 4,5$  °C i a una temperatura de 27,5 °C. La major part d'impactes (53 %) afecten peixos i cnidaris, però molts altres grups també es veuen alterats: esponges, poliquets, mol·luscs, ascidis, briozous, equinoderms, crustacis, entre els invertebrats; rèptils i mamífers, entre els vertebrats; així com fitoplàncton i macròfits (macroalgues i fanerògames marines). Les espècies sèssils són més afectades que les vàgils, però ho són si hi ha anomalies tèrmiques més elevades; de fet, la supervivència és el tret més alterat. Les espècies vàgils i, concretament, els peixos, sobre els quals hi ha més informació (vegeu l'apartat 11.4.3, «Peixos»), mostren respostes a pujades relativament minses de la temperatura.

Les onades de calor, en especial les registrades els anys 1996, 1999 i 2003, van tenir un impacte molt gran en els organismes bentònics suspensívors (esponges, briozous, mol·luscs i, especialment, cnidaris: gorgònies; Garrabou *et al.*, 2009) que formen comunitats molt biodiverses (vegeu l'apartat 11.3.1). Les onades de calor provoquen clars increments de la mortalitat, mentre que l'augment gradual de la temperatura sembla afectar més l'abundància, la migració i la fenologia de les espècies (Marbà *et al.*, 2015a).

A més de l'efecte directe en els organismes, la pujada de la temperatura provoca alteracions en processos que també influeixen en la biota i les comunitats. Per exemple, l'estratificació estival de les aigües, que és més intensa i duradora a mesura que augmenta la temperatura (i que va ser una de les causes de les grans mortaldats de suspensívors durant els anys que hem indicat), significa un fre a l'entrada de nutrients en les aigües superficials, la qual només es trenca amb la barreja autumnal, i que la persistència de la termoclina fa endarrerir. Hom ha indicat també una reducció de la producció primària en l'oceà tropical i subtropical, així com una expansió dels girs subtropicals. D'altra banda, hi ha sinergies amb altres factors que afecten negativament la biota, com ara la contaminació.

En resum, Marbà *et al.* (2015a) conclouen que la biota de la mar Mediterrània és molt més sensible a l'escalfament que allò que es podria predir a partir només dels efectes metabòlics. A aquests efectes directes cal afegir els indirectes, entre ells l'aportació de nutrients i de processos físics i les sinergies amb altres tensions de l'ecosistema.

Tal com sintetitzen Coll *et al.* (2010), la biodiversitat dels ecosistemes marins a la Mediterrània es veu (i es veurà) afectada per una sèrie de factors antropogènics, alguns relacionats amb el clima, però d'altres no (figura 11.5).

### 11.7. Serveis ecosistèmics

Des del punt de vista dels beneficis per a la població humana del país, els ecosistemes marins proveeixen d'una sèrie de serveis que cal tenir molt en compte a l'hora d'anticipar les conseqüències del canvi climàtic. El mar contribueix a regular el clima i la disponibilitat d'aigua dolça, i els ecosistemes litorals protegeixen la línia de costa. El mar proveeix d'aliment, aigua per a beure i fonts d'energia, i significa una via de transport per a persones i mercaderies. També és el gran abocador, reciclador i diluïdor de molts dels nostres residus.

Dels organismes marins s'extreuen substàncies d'interès farmacèutic. A més, el mar és un marc cultural irrenunciable i font d'esbarjament i de negoci. Tots aquests serveis que el mar ofereix, hom els anomena genèricament *serveis ecosistèmics* o *serveis ambientals* (MEA, 2005). Tenir i mantenir uns ecosistemes marins saludables té, doncs, una importància enorme per al benestar de la població. Entendre'n la variabilitat al llarg del temps i la influència que hi tenen les activitats humanes i el canvi climàtic és essencial per a planificar-ne la gestió i predir l'evolució del país en els propers decennis. A continuació comentem alguns d'aquests serveis.

La Mediterrània té una gran importància en la regulació del clima a Catalunya, especialment a la façana litoral, per mitjà dels intercanvis de calor i vapor d'aigua. El mar ajuda a regular els extrems de temperatura, però, sobretot, alimenta bona part de la precipitació que, al capdavant, determina la disponibilitat d'aigua de consum i de reg. El SICCC ja descrivia el consens dels models en la predicció que la precipitació mitjana a Catalunya disminuirà durant el s. XXI; tanmateix, les previsions apuntaven que una mar progressivament més càlida podia comportar un augment dels episodis de precipi-

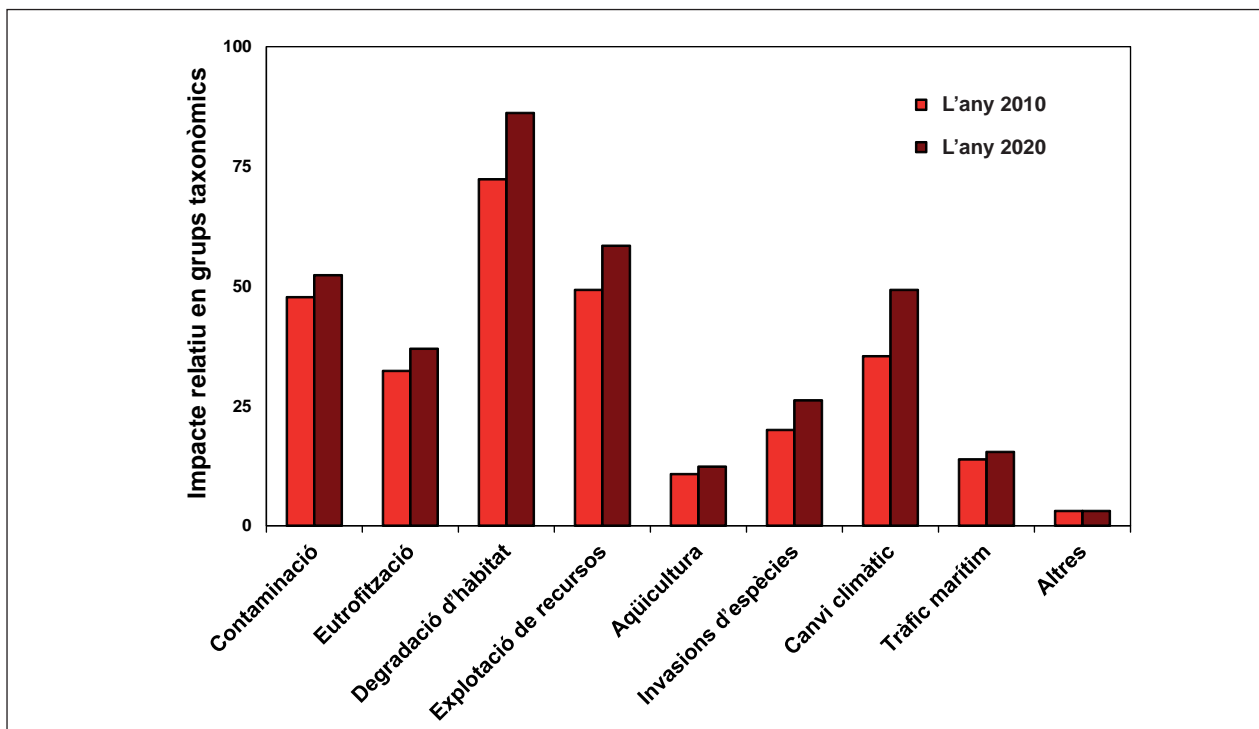


FIGURA 11.5. Amenaces actuals i futures per a la biodiversitat de la Mediterrània per tretze grups taxonòmics a partir de l'opinió d'experts. S'ha tingut en compte la importància relativa de cada amenaça per a la biodiversitat del grup.

Font: Adaptada de Coll *et al.*, 2010.

tació extrems en les estacions humides, especialment a la tardor. En conjunt, però, cal esperar més dificultats en la disponibilitat d'aigua.

A més llarg termini, el mar contribueix a regular el clima també per mitjà dels intercanvis de CO<sub>2</sub> i d'altres substàncies d'impacte climàtic. Com hem explicat al capítol 3, apartat 3.3, la mar catalana actua d'embornal de l'increment de CO<sub>2</sub> a l'atmosfera, fins al punt d'haver retirat uns 12 Mg de carboni per hectàrea en els últims dos-cents cinquanta anys.

Els ecosistemes litorals, i en especial els alguers de *Posidonia oceanica* i les tenasses de l'alga calcària *Lithophyllum byssoides*, els esculls de vermèdids (*Dendropoma*, mol·luscs) i *Sabellaria* (cucs) o bé el recobriment de glans de mar en la roca supralitoral i mediolitoral, tenen una funció d'esmoreïment de l'onatge i de subjecció dels fons tous, de manera que protegeixen la costa de l'erosió. Els alguers de *Posidonia* estan disminuint en extensió al llarg de bona part del litoral català, principalment per efecte de la pesca d'arrossegament i de la terbolesa de l'aigua. L'increment del nivell del mar i de la freqüència de les tempestes d'onatge moderades de tardor en els darrers decennis fan preveure un augment del risc d'erosió litoral a causa del canvi climàtic (Sánchez-Arcilla *et al.*, 2010). De fet, la regressió dels alguers no fa més que incrementar aquest risc. Pel que fa a les estructures calcàries de recobriment de fons rocosos o sorrencs com els esculls d'algues, mol·luscs, cucs i cirrípedes responen de manera diferent als efectes del canvi climàtic: mentre que els esculls de vermèdids són termòfils i hom en pot preveure l'expansió cap al nord, les tenasses són més pròpies d'aigües temperades i un escalfament les afectarà negativament.

Al capítol 13 ja hem explicat que els ecosistemes marins mediterranis, pelàgics i bentònics proveeixen d'aliment per mitjà de la pesca de tota mena. Val a dir, també, que els productes del mar són components essencials de l'anomenada *dieta mediterrània*. Hi ha molts estudis que associen aquesta dieta a la salut i la qualitat de vida. En particular, les poblacions mediterrànies presenten freqüències més baixes d'afeccions cardiovasculars i càncers i hom ha relacionat el consum de peix a la Mediterrània amb una disminució de la

depressió en adults i de les afeccions respiratòries en infants i una millora de la salut òssia en general. El canvi climàtic actua sinèrgicament amb la sobrepesca, la pol·lució, els patògens i les toxines perquè amenaça la disponibilitat i qualitat d'algunes espècies d'interès alimentari, per a la salut o d'alt valor afegit (Lloret, 2010).

En els darrers anys l'interès pel potencial dels organismes i ecosistemes marins de proveir de compostos actius útils en farmàcia i cosmètica, entre d'altres aplicacions, ha crescut (Lloret, 2010). S'estan provant substàncies antibacterianes, antifúngiques, antivirals, citotòxiques o antioxidants aïllades d'organismes majorment bentònics (esponges, briozous, ascidis, cnidaris, fanerògames, etc.). Cal mirar, doncs, amb preocupació els episodis de mortaldat massiva d'espècies suspensívores de comunitats bentòniques causats per les onades de calor (Simó *et al.*, 2010).

La vida vora el mar comporta una sèrie de beneficis psicològics, emocionals i culturals difícils de quantificar. D'entrada, l'esbargiment a la natura comporta un exercici físic que ajuda a millorar la salut cardiovascular i a prevenir l'obesitat i el càncer. Però és que, a més, ajuda a reduir l'estrès, a millorar l'ànim i a prevenir malalties mentals (Lloret, 2010). El mar, per a molta població del nostre país, constitueix un marc cultural en què se situen identitats, oficis, lligams històrics, estètica i, fins i tot, marques comercials; és una font inesgotable d'inspiració per a la creació en l'art i el disseny. I és també una font de recursos educatius, tant per a l'educació reglada com per a la del lleure. Tanmateix, aquests serveis culturals depenen en bona part de l'estat de l'ecosistema i de com és percebut. La degradació del litoral, la pèrdua de biodiversitat o l'increment de la percepció d'amenaça que representen les tempestes i inundacions comporten una disminució del valor cultural del mar.

El mar i el litoral són els actius principals d'un dels motors econòmics del país: el turisme. Prop de vint milions de turistes visiten Catalunya cada any, la majoria atrets per les platges. De fet, les nostres platges reben més de 250 milions de visites per motius purament d'esbargiment (Nunes *et al.*, 2015). Allò que més valoren els usuaris de les plat-

ges és l'estat general, principalment la qualitat de l'aigua i la conservació dels hàbitats (Kontogianni i Emmanouilides, 2014). L'acceleració de l'erosió de les platges, la degradació general dels ecosistemes originals i referencials i l'abundància de meduses, per esmentar tres fenòmens que es veuen afectats pel canvi climàtic, van en detriment del turisme de mar. En el cas del darrer fenomen, la presència de meduses al litoral sol coincidir amb l'estació amb un nombre més gran de turistes; les localitzacions on les picades són més freqüents passen a ser menys atractives a l'hora de repetir una visita (Canepa *et al.*, 2014).

### 11.8. Conclusions

El capítol analitza allò que se sap pel que fa als efectes del canvi climàtic en les característiques fisicoquímiques, els processos hidrogràfics i ecològics, els organismes, les comunitats i els serveis ecosistèmics de la mar Mediterrània com a una continuació d'allò que s'indicava en el capítol corresponent del SICCC. La Mediterrània es mostra especialment sensible al canvi climàtic a causa de les característiques de conca tancada i a l'elevada biodiversitat.

S'han registrat pujades de la temperatura de l'aigua entre 0,3 °C i 0,19 °C per decenni en els primers 50 m i 80 m de profunditat, respectivament, i augments del nivell del mar de 3,9 cm de mitjana per decenni. Per sota dels 1.000 m, a la mar Mediterrània és on s'ha incrementat la salinitat de manera més dràstica (> 0,05 PSS del 1950 al 2010 entre 1.000 i 1.500 m). En aigües superficials, aquesta tendència no és tan clara. En canvi, a la mar Mediterrània encara no es pot detectar una tendència clara d'acidificació ni hi ha evidència que el litoral català s'estigui eutrofitzant. Sí que la columna d'aigua de la mar Mediterrània presenta una tendència cap a una estratificació més gran, la qual cosa incideix en la circulació termohalina, que ha experimentat canvis importants en els darrers decennis, dels quals caldrà estudiar l'efecte futur, ja que no és clara la relació que tenen amb el canvi climàtic.

La comunitat del coral·ligen, amenaçada per diversos impactes (arts de pesca, ancoratge d'embarcacions, «trepig» dels escafandristes, efecte de diferents contaminants, espècies exòtiques

invasores), també ho està pel canvi climàtic. Hi ha hagut diversos episodis de mortaldats, principalment d'invertebrats suspensívors, com a resultat d'episodis d'escalfament de les aigües superficials pel retard de la barreja vertical de les aigües i del trencament de la termoclina a la tardor. La recuperació d'aquests organismes de vida llarga és molt lenta i la taxa de reclutament es veu afectada negativament. Com que són espècies estructurals, tota la comunitat en rep l'impacte.

L'alguer de *P. oceanica* (l'altina), molt afectat per diverses activitats humanes, és sensible a l'increment de la temperatura i a la terbolesa de les aigües. De fet, algunes estimacions indiquen que a mitjan segle XXI els alguers de *Posidonia* és possible que estiguin funcionalment extingits. La pujada de la temperatura pot també eliminar el paper d'embornal de CO<sub>2</sub> que ara té l'alguer i pot afavorir l'expansió d'espècies d'algues al·lòctones, les quals competeixen per l'espai amb l'altina i amb altres fanerògames. Els meteors catastròfics, que semblen augmentar a causa del canvi climàtic, poden afectar, ultra els alguers de fanerògames, les macroalgues, les quals ja es troben sotmeses a diverses pressions antròpiques; atès que tots aquests macròfits són espècies enginyeres o estructurals, l'impacte es transmet a tota la comunitat. A més, l'acidificació també pot afectar les algues incrustants.

La producció primària neta sembla que no ha d'augmentar en l'escenari actual d'increment de la temperatura. No s'han documentat canvis significatius en l'abundància de les espècies del bacterioplàncton ni del picofitoplàncton, mentre que la gruixària dels cocòlits de les algues cocolitoforals sembla que s'ha reduït, potser per efecte de l'acidificació.

Pel que fa als invertebrats, les espècies que viuen associades amb simbionts algals són més sensibles a la pujada de la temperatura, mentre que a les espècies termòfiles, tant d'invertebrats com de peixos, tant autòctones com exòtiques, aquest fet els facilita una expansió cap a àrees que abans no ocupaven. Les fases larvals o juvenils de diferents invertebrats i peixos es poden veure afectades per l'augment de temperatura i per l'acidificació de l'aigua.

En relació amb les meduses de les costes catalanes, hi ha una tendència a l'increment, en concordança amb els factors ambientals que els són favorables, molts dels quals resulten del canvi climàtic (hiverns suaus, primaveres poc plujoses i estius càlids, principalment).

L'augment de la temperatura de l'aigua i l'ampliació de la durada de l'estratificació estival de la columna d'aigua afavoreixen les algues dinoflagel·lades i, entre elles, les causants d'episodis de proliferació de microalgues nocives o tòxiques. Altres activitats humanes que també s'estan incrementant, com les entrades de nutrients al litoral i l'enginyeria de la costa, afavoreixen així mateix aquestes proliferacions.

Pel que fa a la biodiversitat, que és molt elevada a la mar Mediterrània, ja hi ha dades directes o indirectes de l'afectació que pateixen pel canvi climàtic. La major part dels estudis sobre els impactes de l'escalfament de les aigües constaten variacions en l'abundància poblacional i en la supervivència de les espècies a les quals fan referència. La migració o el desplaçament de les espècies natives o al·lòctones (principalment, lessepsianes) representen una fracció reduïda dels estudis, fet pel qual els estudis que demostren efectes en la fecunditat, el creixement i la fenologia són pocs. Els principals grups estudiats són cnidaris i peixos, i les espècies més afectades són les sèssils.

Pel que fa als serveis ecosistèmics, la funció d'esmoreïment de l'onatge dels organismes que formen praderies en els fons sedimentaris o recobriments calcaris sobre la roca litoral es veurà afectada quan ho siguin els organismes corresponents. L'impacte en els recursos alimentaris (pesca, marisc) ja es deixa sentir, i els episodis de mortaldat massiva posen en perill la «farmàcia» del mar, com s'han anomenat els compostos actius de moltes algues i invertebrats amb aplicacions mèdiques i altres. Aquest és un exemple d'impacte econòmic negatiu, al qual cal afegir les afectacions al turisme (episodis d'abundància de meduses, reducció de la sorra de les platges, etc.).

### 11.9. Recomanacions

Des d'un punt de vista de gestió, els efectes del canvi climàtic en els ecosistemes marins i costa-

ners es poden abordar des de diferents angles. D'una banda, és important implementar plans i actuacions per a la mitigació de les emissions de CO<sub>2</sub>, que són l'arrel, per exemple, del problema de l'escalfament global i de l'acidificació. En aquest sentit, cal continuar impulsant mesures de reducció d'aquest i d'altres gasos amb efecte d'hivernacle (GEH) en tots els sectors (energia, transport, indústria, agricultura, residus), fet pel qual caldrà posar un èmfasi especial en la crema de combustibles fòssils, que segueix sent la part més important de les emissions de GEH a Catalunya. De l'altra, cal establir mesures de protecció dels ecosistemes marins i costaners, sobretot dels hàbitats més vulnerables. Cal, per exemple, promoure una explotació sostenible dels recursos marins i establir mesures de conservació que vetllin per la preservació de la rica biodiversitat marina de la mar catalana. L'establiment de reserves o àrees de protecció marina amb regulacions específiques sobre la pesca i les activitats recreatives van en aquesta direcció i cal potenciar-les. En tercer lloc, és necessari actuar també en la reparació dels ecosistemes que ja han patit afectacions. Per exemple, malgrat la dificultat de revertir el declivi dels alguers de *Posidonia*, alguns estudis pilot de restauració mitjançant plàntules obtingudes de llavors naturals són optimistes pel que fa a aquesta possibilitat a petita escala, però es dubta que puguin funcionar a gran escala. Una cosa similar es pot dir de les espècies d'invertebrats suspensívors que han patit episodis de mortaldat, i per a algunes de les quals els estudis pilot de reimplantació comencen a donar resultats positius. Cal, però, assenyalar que si les condicions ambientals que provoquen els episodis de mortaldat no canvien, aquesta restauració pot ser inútil. Finalment, cal també fer un esforç a l'hora de planificar com ens adaptarem als canvis que siguin inevitables. En aquest sentit, cal destacar els esforços recollits en l'Estratègia Catalana d'Adaptació al Canvi Climàtic (ESCACC; Generalitat de Catalunya, 2012), i promoure plans de gestió dels recursos naturals i d'ús del mar, platges i zones costaneres adaptats a les noves condicions que es projecten per al futur.

Per a minimitzar els efectes de caràcter més global com ara l'escalfament de les aigües o l'acidificació, és important també fer un esforç per a reduir altres afectacions més locals derivades de

les activitats humanes que sovint interaccionen de manera sinèrgica amb els ecosistemes marins (per exemple, la sobrepesca, la destrucció d'habitats, la contaminació). De fet, alguns treballs apunten que les accions globals de mitigació d'emissions de GEH podrien servir de poc si no es combinen amb actuacions de minimització dels efectes a escala més local. En aquest sentit, i a causa de la generalització dels casos d'expansió d'espècies alienes d'origen tropical o subtropical a la Mediterrània, arribades de maneres diferents però que s'hi instal·len i s'expandeixen amb l'escalfament de les aigües, caldria anar amb molta més cura pel que fa al control de la comercialització d'espècies d'aquari o de suposades espècies controladores d'espècies plaga, en la vigilància del buidat de les aigües de llast de vaixells i en altres causes immediates o mediatas d'entrada d'aquelles espècies alienes potencialment invasores a la Mediterrània.

Un aspecte a considerar, ara que ja hi ha treballs que indiquen quines seran les àrees litorals més afectades per la pujada del nivell del mar (capítol 8), seria precisament garantir que la pujada associada de les comunitats (per exemple, l'alguer de *Posidonia*) no es veïés afectada per impediments artificials, com dics i altres mesures destinades precisament a impedir la intrusió marina. D'aquesta manera, es podria garantir que la pèrdua de l'alguer en profunditat (com s'ha esmentat en l'apartat 11.3.2.) es compensés a llarg termini amb la reconstitució de l'alguer en els nous espais somers ocupats pel mar.

Òbviament, el nombre de possibilitats d'abordar els efectes del canvi climàtic en els ecosistemes marins i costaners i les probabilitats d'èxit es reduiran a mesura que el canvi climàtic vagi progressant i les conseqüències que se'n deriven es vagin manifestant de manera més evident, per la qual cosa és molt important fomentar les diferents actuacions tan aviat com sigui possible.

Pel que fa a necessitats de recerca, és imprescindible promoure programes de seguiment per a determinar l'evolució de les principals variables físiques, químiques i biològiques indicadores del canvi climàtic i ambiental i de la velocitat a què evoluciona. Aquest seguiment convindria fer-lo de manera sistemàtica al litoral català i a mar obert,

però, molt especialment, en àrees protegides on, gràcies a la gestió i la reducció dels altres factors d'impacte, podem discernir i valorar els efectes del canvi climàtic. Idealment, seria molt valuós disposar d'una xarxa d'observatoris marins anàloga a la que hi ha d'observatoris meteorològics en tot el país. És igualment necessari potenciar la recerca sobre els efectes del canvi climàtic en els organismes i les comunitats marines i entendre més a fons els mecanismes i processos a través dels quals el canvi climàtic actua en els ecosistemes marins.

### Referències bibliogràfiques

- ADLOFF, F.; SOMOT, S.; SEVAULT, F. [et al.] (2015). «Mediterranean Sea response to climate change in an ensemble of twenty first century scenarios». *Climate Dynamics*. DOI: 10.1007/s00382-015-2507-3.
- ARIN, L. [et al.] (2013). «Open sea hydrographic forcing of nutrient and phytoplankton dynamics in a Mediterranean coastal ecosystem». *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 133, p. 116-128.
- ARIZMENDI-MEJÍA, R.; LEDOUX, J.-B.; CIVIT, S. [et al.] (2015). «Demographic responses to warming: Reproductive maturity and sex influence vulnerability in an octocoral». *Coral Reefs*. DOI: 10.1007/s00338-00015-01332-00339.
- BALLESTEROS, E. (2006). «Mediterranean coralligenous assemblages: A synthesis of present knowledge». *Oceanography and Marine Biology*, 44, p. 123-195.
- BARALE, V.; JAQUET, J. M.; NDIAYE, M. (2008). «Algal blooming patterns and anomalies in the Mediterranean Sea as derived from the SeaWiFS data set (1998-2003)». *Remote Sensing of Environment*, 112, p. 3300-3313.
- BATES, N. R.; ASTOR, Y. M.; CHURCH, M. J. [et al.] (2014). «A time-series view of changing ocean chemistry due to ocean uptake of anthropogenic CO<sub>2</sub> and ocean acidification». *Oceanography*, 27, p. 126-141.
- BEN HAJ, S.; LIMAM, A. (2010). «Impact of climate change on marine and coastal biodiversity in the Mediterranean Sea: Current state of knowledge». *Tunis*, p. 1-28.

- BEN RAIS LASRAM, F.; GUILHAUMON, F. [et al.] (2010). «The Mediterranean Sea as a *cul-de-sac* for endemic fishes facing climate change». *Global Change Biology*, 16, p. 3233-3245.
- BERNARD, P.; BERLINE, L.; GORSKY, G. (2011). «Long term (1981–2008) monitoring of the jellyfish *Pelagia noctiluca* (Cnidaria, Scyphozoa) on the French Mediterranean coasts». *Journal of Oceanography, Research and Data*, 4, p. 1-10.
- BORGHINI, M.; BRYDEN, H.; SCHROEDER, K. [et al.] (2014). «The Mediterranean is becoming saltier». *Ocean Science*, 10, p. 693-700.
- BOUDOURESQUE, C. F.; MEINESZ, A. (1982, 1991). *Découverte de l'herbier de posidonie*. Hyères: Parc National de Port-Cros.
- BRAMANTI, L.; MOVILLA, J.; GURON, M. [et al.] (2013). «Detrimental effects of ocean acidification on the economically important Mediterranean red coral (*Corallium rubrum*)». *Global Change Biology*, 19, p. 1897-1908.
- BROTZ, L.; CHEUNG, W. W. L.; KLEISNER, K. [et al.] (2012). «Increasing jellyfish populations: trends in Large Marine Ecosystems». *Hydrobiologia*, 690, p. 3-20.
- BURROWS, M. T.; SCHOEMAN, D. S.; RICHARDSON, A. J. [et al.] (2014). «Geographical limits to species-range shifts are suggested by climate velocity». *Nature*, 507, p. 492-495.
- CALVO, E.; SIMÓ, R.; COMA, R. [et al.] (2011). «Effects of climate change on Mediterranean marine ecosystems: the case of the Catalan Sea». *Climate Research*, 50, p. 1-29.
- CANEPA, A.; FUENTES, V.; SABATÉS, A. [et al.] (2014). «*Pelagia noctiluca* in the Mediterranean Sea». A: *Jellyfish Blooms*. Nova York: Springer Netherlands, p. 237- 266.
- CAROSELLI, E.; GOFFREDO, S. (2014). «Mediterranean coral population dynamics: A tale of 20 years of field studies». A: *The Mediterranean Sea: Its history and present challenges*. Nova York: Springer Netherlands, p. 275-284.
- CEBRIÁN, E.; URIZ, M. J.; GARRABOU, J. [et al.] (2011). «Sponge mass mortalities in a warming Mediterranean Sea: Are cyanobacteria-harboring species worse off?». *Plos One*, 6. DOI: 20210.21371/journal.pone.0020211.
- COHU, S.; MANGIALAJO, L.; THIBAUT, T. [et al.] (2013). «Proliferation of the toxic dinoflagellate *Ostreopsis cf. ovata* in relation to depth, biotic substrate and environmental factors in the North West Mediterranean Sea». *Harmful Algae*, 24, p. 32-44.
- COLL, M.; PIRODDI, C.; STEENBEEK, J. [et al.] (2010). «The biodiversity of the Mediterranean Sea: Estimates, patterns, and threats». *Plos One*, 5. DOI: 10.1371/journal.pone.0011842.
- COMA, R.; LLORENTE-LLURBA, E.; SERRANO, E. [et al.] (2015). «Natural heterotrophic feeding by a temperate octocoral with symbiotic zooxanthellae: a contribution to understanding the mechanisms of die-off events». *Coral Reefs*, 34, p. 549-560.
- COMPANY, J. B.; PUIG, P.; SARDÀ, F. [et al.] (2008). «Climate influence on deep sea populations». *Plos One*, 3. DOI: 10.1371/journal.pone.0001431.
- CONDON, R. H.; DUARTE, C. M.; PITT, K. A. [et al.] (2013). «Recurrent jellyfish blooms are a consequence of global oscillations». *PNAS*, 110, p. 1000-1005.
- CRISCI, C.; BENSOUSSAN, N.; ROMANO, J. C. [et al.] (2011). «Temperature anomalies and mortality events in marine communities: Insights on factors behind differential mortality Impacts in the NW Mediterranean». *Plos One*, 6. DOI: 23810.21371/journal.pone.0023814.
- DALY YAHIA, M. N.; BATISTIC, M.; LUCIC, D. [et al.] (2010). «Are the outbreaks of *Pelagia noctiluca* (Forsskål, 1775) more frequent in the Mediterranean basin?». A: *Proceedings of the joint ICES/CIESM workshop to compare zooplankton ecology and methodologies between the Mediterranean and the North Atlantic (WKZEM)*. ICES Cooperative Research Report, p. 8-14.
- DI CAMILLO, C. G.; CERRANO, C. (2015). «Mass mortality events in the NW Adriatic Sea: Phase shift from slow- to fast-growing organisms». *Plos One*, 10. DOI: 10.1371/journal.pone.0126689.
- DISSANAYAKE, A. (2014) «Ocean acidification and warming effects on crustacea: Possible future scenarios». A: *The Mediterranean Sea*. Nova York: Springer Netherlands, p. 363-372.

- DUARTE, C. M. (2014). «Global change and the future ocean: A grand challenge for marine sciences». *Frontiers in Marine Science*. DOI: 10.3389/fmars.2014.00063.
- DUARTE, C. M.; PITT, K. A.; LUCAS, C. H. [et al.] (2012). «Is global ocean sprawl a cause of jellyfish blooms?». *Frontiers in Ecology and the Environment*, 11, p. 91-97.
- DURACK, P. J. (2015). «Ocean salinity and the global water cycle». *Oceanography*, 28, p. 20-31.
- FLO, E.; GARCÉS, E.; MANZANERA, M. [et al.] (2010). «Inshore Mediterranean waters: opening the black box». *EUTRO 2010*.
- GARCÉS, E.; CAMP, J. (2012). «Habitat changes in the Mediterranean Sea and the consequences for Harmful Algal Blooms formation». A: STAMBLER, N. (ed.). *Life in the Mediterranean Sea: A look at habitat changes*. Nova York: Science Publishers, Inc., p. 519-541.
- GARCÉS, E.; MASÓ, M.; CAMP, J. (2002). «Role of temporary cysts in the population dynamics of *Alexandrium taylori* (Dinophyceae)». *Journal of Plankton Research*, 24, p. 681-686.
- GARRABOU, J.; COMA, R.; BENSOUSSAN, N. [et al.] (2009). «Mass mortality in Northwestern Mediterranean rocky benthic communities: effects of the 2003 heat wave». *Global Change Biology*, 15, p. 1090-1103.
- GATTUSO, J. P.; MAGNAN, A.; BILLÉ, R. [et al.] (2015). «Contrasting futures for ocean and society from different anthropogenic CO<sub>2</sub> emissions scenarios». *Science*, 349. DOI: 10.1126/science.1244722.
- GAZEAU, F.; PARKER, L.; COMEAU, S. [et al.] (2013). «Impacts of ocean acidification on marine shelled molluscs». *Marine Biology*, 160, p. 2207-2245.
- GILI, J. M.; FUENTES, V.; ATIENZA, D. [et al.] (2010). «Report of the Medusa Project». *Tech Rep*, 8.
- GILI, J. M.; ROS, J. D. (1984). «L'estatge circalitoral de les illes Medes: el coral-ligen». A: *Els sistemes naturals de les illes Medes*. Barcelona: Institut d'Estudis Catalans, p. 677-705.
- HAGUENAUER, A.; ZUBERER, F.; LEDOUX, J. B. [et al.] (2013). «Adaptive abilities of the Mediterranean red coral *Corallium rubrum* in a heterogeneous and changing environment: from population to functional genetics». *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 449, p. 349-357.
- HASSOUN, A. E. R.; GUGLIELMI, V.; GEMAYEL, E. [et al.] (2015). «Is the Mediterranean Sea circulation in a steady state?». *Journal of Water Resources and Ocean Science*, 4, p. 6-17.
- HERRMANN, M.; ESTOURNEL, C.; ADLOFF, F. [et al.] (2014). «Impact of climate change on the north-western Mediterranean Sea pelagic planktonic ecosystem and associated carbon cycle». *Journal of Geophysical Research*, 119, p. 5815-5836.
- JORDÀ, G.; MARBÀ, N.; DUARTE, C. M. (2012). «Mediterranean seagrass vulnerable to regional climate warming». *Nature Climate Change*, 2, p. 821-824.
- KERSTING, D. K.; BALLESTEROS, E.; CARALT, S. DE. [et al.] (2014). «Invasive macrophytes in a marine reserve (Columbretes Islands, NW Mediterranean): spread dynamics and interactions with the endemic scleractinian coral *Cladocora caespitosa*». *Biological Invasions*, 16, p. 1599-1610.
- KERSTING, D. K.; BENSOUSSAN, N.; LINARES, C. (2013). «Long-term responses of the endemic reef-builder *Cladocora caespitosa* to Mediterranean warming». *Plos One*, 8, 12. DOI: 10.1371/journal.pone.0070820.
- KERSTING, D. K.; LINARES, C. (2012). «*Cladocora caespitosa* bioconstructions in the Columbretes Islands Marine Reserve (Spain, NW Mediterranean): distribution, size structure and growth». *Marine Ecology*, 33, p. 427-436.
- KIPSON, S.; LINARES, C.; TEIXIDÓ, N. [et al.] (2012). «Effects of thermal stress on early developmental stages of a gorgonian coral». *Marine Ecology Progress Series*, 470, p. 69-78.
- KONTOGIANNI, A. D.; EMMANOULIDES, C. J. (2014). «The cost of a gelatinous future and loss of critical habitats in the Mediterranean». *ICES Journal of Marine Science*, 71, p. 853-866.
- KROEKER, K. J.; KORDAS, R. L.; CRIM, R. N. [et al.] (2010). «Meta-analysis reveals negative yet variable effects of ocean acidification on marine organisms». *Ecology Letters*, 13, p. 1419-1434.



- LARKUM, A. W. D.; ORTH, J. J.; DUARTE, C. M. (2006). «Seagrasses: Biology, ecology and their conservation». Dordrecht: Kluwer.
- LAZZARI, P.; MATTIA, G.; SOLIDORO, C. [et al.] (2014). «The impacts of climate change and environmental management policies on the trophic regimes in the Mediterranean Sea: Scenario analyses». *Journal of Marine Systems*, 135, p. 137-149.
- LEGRAND, C.; CASOTTI, R. (2010). «Climate-induced changes and harmful algal blooms in the Mediterranean: perspectives on future scenarios». A: *Phytoplankton responses to Mediterranean environmental changes*. Mònaco: F. Briand, p. 63-66.
- LEJEUSNE, C.; CHEVALDONNÉ, P.; PERGENT-MARTINI, C. [et al.] (2010). «Climate change effects on a miniature ocean: the highly diverse, highly impacted Mediterranean Sea». *Trends in Ecology and Evolution*, 25, p. 250-260.
- LINARES, C.; CEBRIÁN, E.; KIPSON, S. [et al.] (2013). «Does thermal history influence the tolerance of temperate gorgonians to future warming?». *Marine Environmental Research*, 89, p. 45-52.
- LINARES, C.; VIDAL, M.; CANALS, M. [et al.] (2015). «Persistent natural acidification drives major distribution shifts in marine benthic ecosystems». *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 282.
- LLORET, J. (2010). «Human health benefits supplied by Mediterranean marine biodiversity». *Marine Pollution Bulletin*, 60, p. 1640-1646.
- LLORET, J.; SABATÉS, A.; MUNOZ, M. [et al.] (2015). «How a multidisciplinary approach involving ethnoecology, biology and fisheries can help explain the spatio-temporal changes in marine fish abundance resulting from climate change». *Global Ecology and Biogeography*, 24, p. 448-461.
- MACÍAS, D.; GARCIA-GORRIZ, E.; STIPS, A. (2013). «Understanding the causes of recent warming of mediterranean waters. How much could be attributed to climate change?». *Plos One*, 8. DOI: 81510.81371/journal.pone.0081591.
- MADRON, X. D.; GUIEU, C.; SEMPÉRÉ, R. [et al.] (2011). «Marine ecosystems' responses to climatic and anthropogenic forcings in the Mediterranean by "The MERMEX Group"». *Progress in Oceanography*, 91, p. 97-166.
- MARBÀ, N.; DUARTE, C. M. (2010). «Mediterranean warming triggers seagrass (*Posidonia oceanica*) shoot mortality». *Global Change Biology*, 16, p. 2366-2375.
- MARBÀ, N.; JORDÀ, G.; AGUSTÍ, S. [et al.] (2015a). «Footprints of climate change on Mediterranean Sea biota». *Frontiers in Marine Science*, 2, p. 56.
- MARBÀ, N.; JORDÀ, G.; AGUSTÍ, S. [et al.] (2015b). «Impacts of climate change on organisms in the Mediterranean Sea [Dataset]». També disponible en línia a: <<http://hdl.handle.net/10261/116098>> [Consulta: 20 febrer 2016].
- MARTÍN, P.; SABATÉS, A.; LLORET, J. [et al.] (2012). «Climate modulation of fish populations: the role of the Western Mediterranean Oscillation (WeMO) in sardine (*Sardina pilchardus*) and anchovy (*Engraulis encrasicolus*) production in the north-western Mediterranean». *Climatic Change*, 110, p. 925-939.
- MARTY, J. C.; CHIAVÉRINI, J. (2010). «Hydrological changes in the Ligurian Sea (NW Mediterranean, DYFAMED site) during 1995-2007 and biogeochemical consequences». *Biogeosciences*, 7, p. 2117-2128.
- MAYNOU, F.; SABATÉS, A.; SALAT, J. (2014). «Clues from the recent past to assess recruitment of Mediterranean small pelagic fishes under sea warming scenarios». *Climatic Change*, 126, p. 175-188.
- MEIER, K. J. S.; BEAUFORT, L.; HEUSSNER, S. [et al.] (2014). «The role of ocean acidification in *Emiliania huxleyi* coccolith thinning in the Mediterranean Sea». *Biogeosciences*, 11, p. 2857-2869.
- MELLA-FLORES, D.; MAZARD, S.; HUMILY, F. [et al.] (2011). «Is the distribution of *Prochlorococcus* and *Synechococcus* ecotypes in the Mediterranean Sea affected by global warming?». *Biogeosciences*, 8, p. 2785-2804.
- MEYER, J.; RIEBESELL, U. (2015). «Reviews and syntheses: Responses of coccolithophores to ocean acidification: a meta-analysis». *Biogeosciences*, 12, p. 1671-1682.
- MICHAELIDIS, B.; PÖRTNER, H. O.; SOKOLOVA, I. [et al.] (2014). «Advances in predicting the impacts of

- global warming on the mussels *Mytilus galloprovincialis* in the Mediterranean Sea». A: GOFFREDO, S.; DUBINSKY, Z. (ed.). *The Mediterranean Sea: Its history and present challenges*. Nova York: Springer Netherlands, p. 319-339.
- MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT (2005). *Ecosystems and human well-being: Synthesis*. Washington DC: Island Press.
- MOLINERO, J. C.; IBANEZ, F.; NIVAL, P. [et al.] (2005). «North Atlantic climate and northwestern Mediterranean plankton variability». *Limnology and Oceanography*, 50, p. 1213-1220.
- MOLINERO, J. C.; CASINI, M.; BUECHER, E. (2008). «The influence of the Atlantic and regional climate variability on the long-term changes in gelatinous carnivore populations in the northwestern Mediterranean». *Limnology and Oceanography*, 53, p. 1456-1467.
- MOORE, S. K.; TRAINER, V. L.; MANTUA, N. J. [et al.] (2008). «Impacts of climate variability and future climate change on harmful algal blooms and human health». *Global Environmental Health*, 7(2), S4.
- MOVILLA, J.; CALVO, E.; PELEJERO, C. [et al.] (2012). «Calcification reduction and recovery in native and non-native Mediterranean corals in response to ocean acidification». *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 438, p. 144-153.
- NAVARRO, L.; BALLESTEROS, E.; LINARES, C. [et al.] (2011). «Spatial and temporal variability of deep-water algal assemblages in the Northwestern Mediterranean: The effects of an exceptional storm». *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 95, p. 52-58.
- NUNES, P. A. L. D.; LOUREIRO, M. L.; PINOL, L. [et al.] (2015). «Analyzing beach recreationists' preferences for the reduction of jellyfish blooms: Economic results from a stated-choice experiment in Catalonia, Spain». *Plos One*, 10. DOI: 10.1371/journal.pone.0126681.
- PAIRAUD, I.; BENSOUSSAN, N.; GARREAU, P. [et al.] (2014). «Impacts of climate change on coastal benthic ecosystems: assessing the current risk of mortality outbreaks associated with thermal stress in NW Mediterranean coastal areas». *Ocean Dynamics*, 64, p. 103-115.
- PALMIÉRI, J.; ORR, J. C.; DUTAY, J. C. [et al.] (2015). «Simulated anthropogenic CO<sub>2</sub> uptake and acidification of the Mediterranean Sea». *Biogeosciences*, 12, p. 781-802.
- PEDERSEN, M. O.; SERRANO, O.; MATEO, M. A. [et al.] (2011). «Temperature effects on decomposition of a *Posidonia oceanica* mat». *Aquatic Microbial Ecology*, 65, p. 169-182.
- PIAZZI, L.; GENNARO, P.; BALATA, D. (2012). «Threats to macroalgal coralligenous assemblages in the Mediterranean Sea». *Marine Pollution Bulletin*, 64, p. 2623-2629.
- POLOCZANSKA, E. S.; BROWN, C. J.; SYDEMAN, W. J. [et al.] (2013). «Global imprint of climate change on marine life». *Nature Climate Change*, 3, p. 919-925.
- PONTI, M.; PERLINI, R. A.; VENTRA, V. [et al.] (2014). «Ecological shifts in Mediterranean coralligenous assemblages related to gorgonian forest loss». *Plos One*, 9. DOI: 10.1371/journal.pone.0102782.
- PORZIO, L.; BUIA, M. C.; HALL-SPENCER, J. M. (2011). «Effects of ocean acidification on macroalgal communities». *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 400, p. 278-287.
- PUIG, P.; MADRON, X. D. D.; SALAT, J. [et al.] (2013). «Thick bottom nepheloid layers in the western Mediterranean generated by deep dense shelf water cascading». *Progress in Oceanography*, 111, p. 1-23.
- PURCELL, J. E.; SABATÉS, A.; FUENTES, V. [et al.] (2012). «Predation potential of blooming jellyfish, *Pelagia noctiluca*, on fish larvae in the NW Mediterranean Sea». A: NORTH PACIFIC MARINE SCIENCE ORGANIZATION. *PICES-2012: Program and Abstracts*. Hiroshima.
- RODOLFO-METALPA, R.; HOOGENBOOM, M. O.; ROTTIER, C. [et al.] (2014). «Thermally tolerant corals have limited capacity to acclimatize to future warming». *Global Change Biology*, 20, p. 3036-3049.
- ROS, J. D. (2009). «El mar i les costes catalanes ja noten l'efecte del canvi climàtic». A: AGÈNCIA CATALANA DE L'AIGUA. *Aigua i canvi climàtic: Diagnosi dels impactes previstos a Catalunya*. Barcelona:

- Generalitat de Catalunya. Agència Catalana de l'Aigua, p. 259-277.
- ROSA, S.; PANSERA, M.; GRANATA, A. [et al.] (2013). «Interannual variability, growth, reproduction and feeding of *Pelagia noctiluca* (Cnidaria: Scyphozoa) in the Straits of Messina (Central Mediterranean Sea): linkages with temperature and diet». *Journal of Marine Systems*, 111-112, p. 97-107.
- SABATÉS, A.; MARTIN, P.; LLORET, J. [et al.] (2006). «Sea warming and fish distribution: the case of the small pelagic fish, *Sardinella aurita*, in the western Mediterranean». *Global Change Biology*, 12, p. 2209-2219.
- SABATÉS, A.; PAGÈS, F.; ATIENZA, D. [et al.] (2010). «Planktonic cnidarian distribution and feeding of *Pelagia noctiluca* in the NW Mediterranean Sea». *Hydrobiologia*, 645, p. 153-165.
- SABATÉS, A.; MARTÍN, P.; RAYA, V. (2012). «Changes in life-history traits in relation to climate change: bluefish (*Pomatomus saltatrix*) in the northwestern Mediterranean». *ICES Journal of Marine Science*. DOI: 10.1093/icesjms/fss1053.
- SABATÉS, A.; SALAT, J.; RAYA, V. [et al.] (2013). «Role of mesoscale eddies in shaping the spatial distribution of the coexisting *Engraulis encrasicolus* and *Sardinella aurita* larvae in the northwestern Mediterranean». *Journal of Marine Systems*, 111-112, p. 108-119.
- SÁNCHEZ-ARCILLA, A.; MÖSSO, C.; SIERRA, J. P. [et al.] (2010). «Climatic drivers of potential hazards in Mediterranean coasts». *Regional Environmental Change*. DOI: 10.1007/s10113-010-0193-6.
- SERRANO, E.; COMA, R.; RIBES, M. [et al.] (2013). «Rapid northward spread of a zooxanthellate coral enhanced by artificial structures and sea warming in the Western Mediterranean». *Plos One*, 8. DOI: 52710.51371/journal.pone.0052739.
- SIMÓ, R.; CALVO, M.; RIBES, M. [et al.] (2010) «Ecosistemes marins». A: LLEBOR, J. E. (ed.). *Segon informe sobre el canvi climàtic a Catalunya*. Barcelona: Generalitat de Catalunya, p. 469-502.
- SKLIRIS, N. (2014). «Past, present and future patterns of the thermohaline circulation and characteristic water masses of the Mediterranean Sea». *The Mediterranean Sea: Its history and present challenges*. New York: Springer Netherlands, p. 29-48.
- SKLIRIS, N.; MARSH, R.; JOSEY, S. A. [et al.] (2014). «Salinity changes in the World Ocean since 1950 in relation to changing surface freshwater fluxes». *Climate Dynamics*, 43, p. 709-736.
- THIBAUT, T.; PINEDO, S.; TORRAS, X. [et al.] (2005). «Long-term decline of the populations of Fucales (*Cystoseira* spp. and *Sargassum* spp.) in the Albesres coast (France, North-western Mediterranean)». *Marine Pollution Bulletin*, 50, p. 1472-1489.
- TOURATIER, F.; GOYET, C. (2011). «Impact of the Eastern Mediterranean transient on the distribution of anthropogenic CO<sub>2</sub> and first estimate of acidification for the Mediterranean Sea». *Deep Sea Research*, 58, p. 1-15.
- VARGAS-YÁÑEZ, M.; GARCÍA, M. J.; SALAT, J. [et al.] (2008). «Warming trends and decadal variability in the Western Mediterranean shelf». *Global and Planetary Change*, 63, p. 177-184.
- VARGAS-YÁÑEZ, M.; MALLARD, E.; RIXEN, M. [et al.] (2012). «The effect of interpolation methods in temperature and salinity trends in the Western Mediterranean». *Mediterranean Marine Science*, 13, p. 118-125.
- VARGAS-YÁÑEZ, M.; MOYA, F.; GARCIA-MARTINEZ, M. C. [et al.] (2010). «Climate change in the Western Mediterranean Sea 1900-2008». *Journal of Marine Systems*. 82, p. 171-176.
- VERGÉS, A.; TOMAS, F.; CEBRIÁN, E. [et al.] (2014). «Tropical rabbitfish and the deforestation of a warming temperate sea». *Journal of Ecology*, 102, p. 1518-1527.
- VILA, M.; ARÍN, L.; BATTOCCHI, C. [et al.] (2012). «Management of *Ostreopsis* blooms in recreational waters along the Catalan coast (NW Mediterranean Sea): cooperation between a research project and a monitoring program». *Cryptogamie, Algologie*, 33, p. 143-152.
- VILLEGAS-HERNÁNDEZ, H.; LLORET, J.; MUÑOZ, M. (2015). «Reproduction, condition and abundance of the Mediterranean bluefish (*Pomatomus saltatrix*) in the context of sea warming». *Fisheries Oceanography*, 24, p. 42-56.

- VILLEGAS-HERNÁNDEZ, H.; MUÑOZ, M.; LLORET, J. (2014). «Life-history traits of temperate and thermophilic barracudas (Teleostei: Sphyraenidae) in the context of sea warming in the Mediterranean Sea». *Journal of Fish Biology*, 84, p. 1940-1957.
- WELLS, M. L.; TRAINER, V. L.; SMAYDA, T. J. [et al.] (2015). «Harmful algal blooms and climate change: Learning from the past and present to forecast the future». *Harmful Algae*, 49, p. 68-93.
- ZUNINO, P.; SCHROEDER, K.; VARGAS-YÁÑEZ, M. [et al.] (2012). «Effects of the Western Mediterranean Transition on the resident water masses: Pure warming, pure freshening and pure heaving». *Journal of Marine Systems*, 96-97, p. 15-23.