



©NASA

Escrit per:

Albert Calbet i Enric Saiz

Institut de Ciències del Mar - CSIC

PLÀNCTON I CANVI CLIMÀTIC

Qui no s'ha empassat mai un glop d'aigua de mar? Ens quedem amb aquell regust salat a la boca que ens recorda que som en un medi que no és el nostre. En el que de ben segur no pensem és en la quantitat de vides que acabem de truncar i engolir. Perquè ens en fem una idea, en uns 10 ml d'aigua, o una glopada de les petites, hi podem trobar més de 10 milions de bacteris, 100000 protists, i amb sort algun crustaci minúscul (Fig. 1). És a dir, tot un univers de bestioles que normalment ens passen desapercebudes (Fig. 2). Penseu que la majoria de la biomassa del planeta està constituïda per formes de vida invisibles a ull nu, un bon nombre de les quals forma part de l'ecosistema marí. És innegable la importància dels oceans en el cicle dels elements i la dinàmica del planeta en si. De fet, malgrat que els oceans representen només un 0.2% de la

biomassa fotosintètica del planeta, gairebé el 50% de la producció primària neta prové de les capes superficials dels oceans. A més, des d'un punt de vista dinàmic, si considerem globalment aquest carboni orgànic d'origen fotosintètic, la taxa de renovació als oceans s'estima aproximadament en una setmana, mentre que en els ecosistemes terrestres trigaria més o menys una dècada.

Aquest gran paper dels oceans en l'abastament de la matèria orgànica que sustenta la vida al planeta, conjuntament amb la seva rellevància purament en termes de superfície (3/4 de la superfície de la Terra) i volum, i les implicacions que té per l'intercanvi gasós amb l'atmosfera fan que, per tot plegat, l'ecosistema marí, i en concret el plàncton, tinguin un paper fonamental per mantenir l'equilibri ecològic de la Terra i per regular-ne el clima.

Davant de l'allau constant de notícies als diaris i la televisió, en aquests darrers anys, respecte al canvi climàtic, els acords de Kyoto, l'emissió de CO₂ per combustió de combustibles fòssils, etc., potser cal tenir una visió oceanogràfica del tema. I això és el que farem aquí. Abans d'entrar en matèria, però, ens caldrà repassar primer com s'estructuren i funcionen les xarxes tròfiques planctòniques marines.

Les xarxes tròfiques planctòniques

En el transcurs de la història de l'oceanografia la nostra visió i comprensió de l'ecosistema planctònic ha anat evolucionant, en gran part a causa dels avenços tecnològics i metodològics, i ha assolit una complexitat que no deixa de sorprendre'ns dia a dia. La visió clàssica d'una cadena tròfica (Fig. 3) en la qual el fitoplàncton (bàsicament diatomees) és consumit per copèpodes (Fig. 4), que són l'aliment dels peixos, ha quedat simplista i esbiaixada. Hem descobert que les interaccions tròfiques en el mar són diverses i imbricades (Sherr i Sherr 1988). A més, sabem que els organismes petits són molt importants en la dinàmica de l'ecosistema planctònic. De fet, els principals "herbívors" al mar són el microzooplàncton (grup heterogeni d'organismes heterotròfics de mida petita, que comprèn ciliats, dinoflagel·lats, flagel·lats, larves de crustaci, etc., Fig. 5), que consumeix al voltant d'un 70% de la producció primària pelàgica marina (Calbet i Landry 2004) i assoleix una posició crucial en les xarxes tròfiques planctòniques. També ens hem adonat que els principals productors primaris (fitoplàncton) en les regions oligotròfiques de l'oceà (que en cobreixen aproximadament 2/3 de superfície) són organismes molt petits, de fet bacteris fotosintètics (Chisholm *et al.* 1988), i que, per tant, el carboni (CO₂) que fixen durant la fotosíntesi entrarà en una xarxa tròfica llarga i complexa, en què la matèria és transferida en multitud de passos i interaccions, amb conseqüents pèrdues energètiques i alliberaments de CO₂ i nutrients orgànics i inorgànics. La majoria d'aquestes substàncies, però, tornaran a entrar al cicle per l'acció

d'altres microorganismes, en un bucle pràcticament sense fi. Una bona part del carboni fixat pels productors primaris de zones oligotròfiques romandrà, doncs, retintut en la capa fòtica dels oceans dins d'aquest circuit que anomenem *microbial loop*.

Contràriament, els productors primaris d'afloraments o zones costaneres més riques (Fig. 6), el mesozoplàncton (principalment copèpodes), són de major grandària i poden ésser consumits directament per organismes relativament més grans, fet que facilitarà una transferència més ràpida i eficient de la matèria orgànica sintetitzada pels productors primaris cap a consumidors de major ordre, com ara els peixos. En molts d'aquests darrers sistemes els productors primaris depenen d'aportacions al·lòctones de nutrients inorgànics essencials (sigui per exemple aigua d'escorrentia, aflorament d'aigües fondes, barreja hidrogràfica estacional de la columna d'aigua), les quals, tanmateix, no són contínues sinó variables en el temps i la intensitat. Els productors primaris, davant d'aquestes aportacions discontinues, respondran també en forma

de polsos de producció primària, que donen lloc a l'acumulació de cèl·lules en proliferacions o *blooms*. A causa del temps diferent de resposta demogràfica dels depredadors mesozoplànctònics, aquests *blooms* o proliferacions no s'evidenciaran en el desenvolupament d'una comunitat concurrent de mesozoplàncton. Així doncs, ja sigui pel desacoblament entre productors i consumidors, o simplement per la mateixa (in)eficiència del mesozoplàncton, una bona part (aproximadament 1/3) del carboni fixat pels productors primaris i convertit en matèria viva particulada, en lloc de ser consumit directament sedimentarà fora de la capa fòtica, on serà remineralitzat per altres microorganismes, o quedarà segregat en el sediment per un llarg període de temps. Tanmateix, aquests sistemes marins, encara que exportin gran part de la seva producció cap a les fondàries oceàniques, transfereixen en valor absolut una major quantitat de matèria orgànica particulada cap a nivells tròfics superiors que no pas els sistemes oligotròfics, i permeten que es sustentin majors abundàncies de peixos, com demostren les grans pesqueries associades a afloraments. En resum, quan

Figura 1. Fase larvària (naupli) del copèpode *Acartia grani*. Els copèpodes passen, majoritàriament, per 12 fases de desenvolupament (mudes), 6 anomenades naupli i 6 copepodit. En arribar a copepodit VI, el copèpode ja és adult i atura pràcticament tot el creixement somàtic.



ens mengem una sardina o un llobarro (depenent de la butxaca de cadascú) estem, de fet, consumint carboni que possiblement hàgim respirat nosaltres mateixos (o els nostres avantpassats) temps enrere.

Clima i plàncton

El clima d'un indret es pot definir com un conjunt característic de paràmetres ambientals. El clima no sol ser constant o estable, sinó que sol haver-hi variacions a

diferents escales (per exemple anuals, de dècades o fins i tot de centenars d'anys). Aquesta variació, que podríem anomenar natural, és conseqüència de la interacció entre els diferents moviments de la Terra, de la variabilitat en l'activitat solar, de l'alliberament de gasos volcànics i pols a l'atmosfera, o de la distribució de la calor als oceans. Les variacions en el clima d'un indret tenen efectes molt importants en el complex ecosistema marí (fluctuacions en l'aportació de nutrients, variacions en el gruix de la termoclina, successió d'espècies, etc.). Deixant de banda les

variacions climatològiques purament estacionals, exemples clàssics molt associats al canvi climàtic global són *El Niño* i l'Oscil·lació de l'Atlàntic Nord (*North Atlantic Oscillation*, NAO). Tant *El Niño* com la NAO són fenòmens que tenen repercussions a escala planetària, però per entendre'n millor la dinàmica ens centrarem en les zones on els seus efectes són més palesos.

En anys de *El Niño* els vents alisis, que normalment afavoreixen els corrents cap a l'oest de la zona equatorial del Pacífic, s'inverteixen i produeixen una acumulació d'aigua calenta superficial a la costa oest del Perú (Fig. 7). Aquest canvi en l'hidrodinamisme de la zona impedeix l'afloreament d'aigües profundes carregades de nutrients a les costes peruanes. El resultat, a part dels episodis tempestuosos violents associats a *El Niño*, és la disminució de la producció primària, amb repercussions pel zooplàncton i espècies de peixos comercials (Niquen i Bouchon 2004). Des d'un punt de vista antropocèntric, la virulència de *El Niño* s'associa a una disminució en les captures de seitó i a un increment (encara que en menor mesura) de la pesca de la sardina. *Els Niños* solen ocórrer cada 3-5 anys, encara que els seus efectes es poden evidenciar durant 1-2 anys a l'atmosfera, i per més temps als oceans. *El Niño* és un exemple de fluctuacions climàtiques d'origen natural, que han tingut lloc periòdicament des de fa centenars d'anys.

La NAO consisteix en variacions en la circulació atmosfèrica a l'Atlàntic Nord a causa del balanç entre les pressions altes i baixes de l'Atlàntic subtropical i de l'Àrtic. Els seus efectes en l'ecosistema marí segueixen un mecanisme més complex i relacionat no només amb l'hidrodinamisme, sinó també amb el cicle de vida dels organismes del plàncton. En anys de NAO positiva els canvis en la circulació oceànica mediat per la climatologia afavoreixen que els corrents d'aigües càlides de l'Atlàntic arribin fins a sobrepassar el mar del Nord. Aquests corrents, conjuntament amb un calentament local de la zona, impedeixen que aigües del mar de

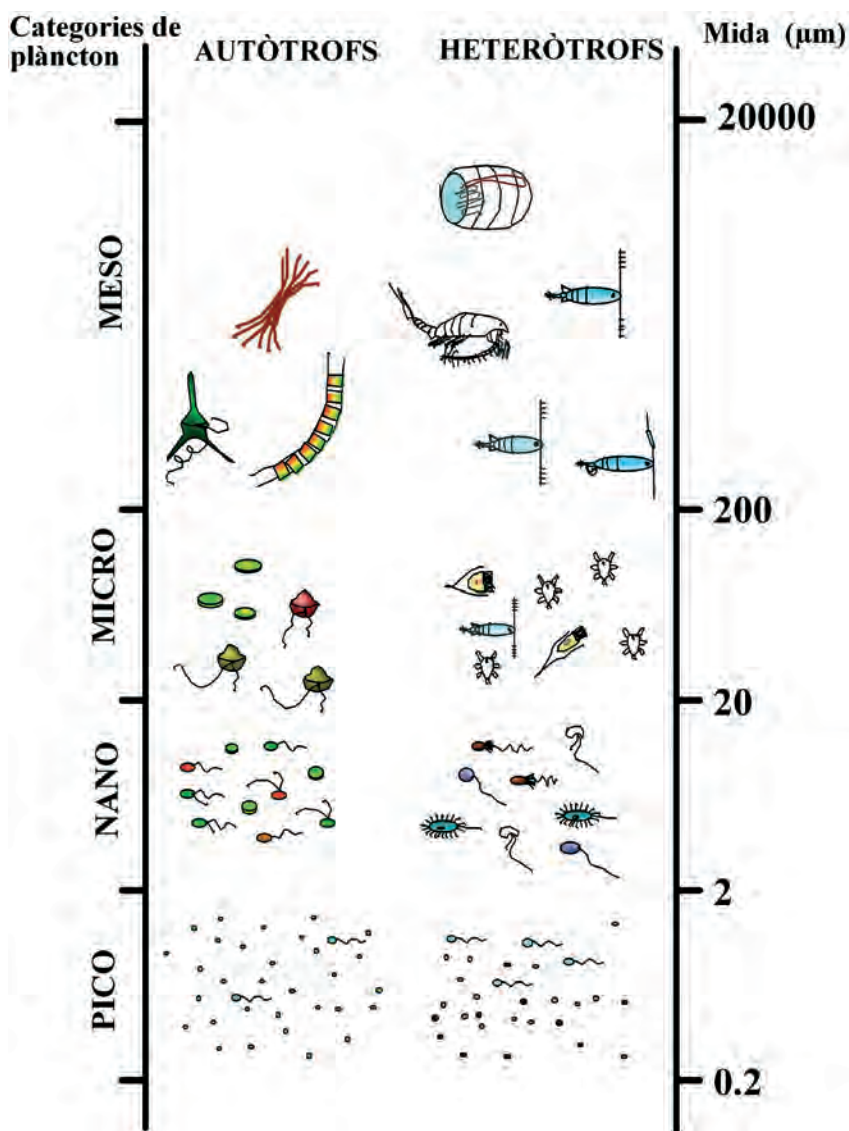


Figura 2. Una manera arbitrària, però molt útil, de classificar els organismes planctònics és en base a la seva mida. Així fem servir els prefixos *pico*-, *nano*-, *micro*- i *meso*- (entre d'altres) per referir-nos als organismes compresos en cada classe de mida.

Noruega carregades amb nous reclutes del copèpode *Calanus finmarchicus* (espècie fonamental en l'ecosistema de la zona) entrin i colonitzin el mar del Nord (Greene *et al.* 2003). El resultat es fa palès al llarg de tota la xarxa tròfica, amb disminucions en, per exemple, les captures de bacallà a la zona, car les larves s'alimenten fonamentalment de *Calanus*.

Canvi climàtic i oceans

Quan els trets que caracteritzen el clima d'un indret varien monotònicament per un nombre llarg d'anys parlem de canvi climàtic. Quan una pauta similar es troba a molts llocs del planeta parlem de canvi climàtic global. Encara que part del canvi climàtic és conseqüència de la variabilitat natural que hem esmentat abans, actualment és una opinió força consensuada que l'home ha influït significativament en els canvis observats en el clima de la Terra durant el segle XX, i en concret per l'emissió de gasos d'efecte hivernacle i partícules (sutge) a l'atmosfera.

Després de la Revolució Industrial s'ha observat un augment de la temperatura global del planeta, d'uns 0.6° al llarg del segle XX, acompanyat d'una recessió en les superfícies recobertes de gel del

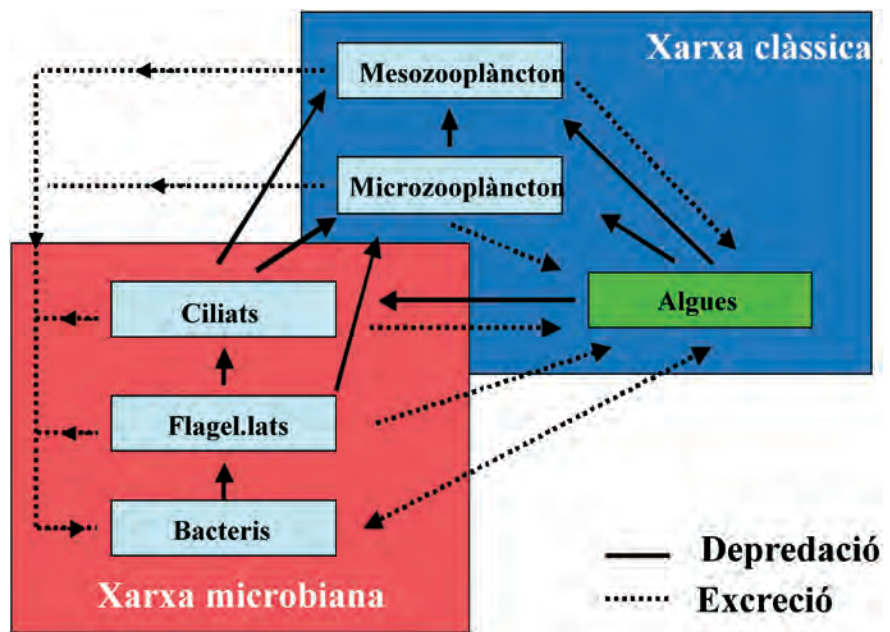


Figura 3. Representació esquemàtica i molt simplificada de les xarxes tròfiques marines.

planeta. Aquest augment de la temperatura també s'ha donat als oceans: durant els darrers 25 anys els oceans s'han escalfat globalment uns 0.3°, especialment les capes superficials (primers 300 m). Les implicacions d'aquest escalfament dels oceans a escala planetària, tant pel que fa als ecosistemes marins, el clima global del planeta i el nostre mode de vida són molt importants. Caldrà considerar, però, que

per una banda els oceans estan subjectats al canvi climàtic, però per l'altra hi participen activament.

Primer de tot, des d'un punt de vista físic, cal recordar que els intercanvis d'energia entre els oceans i l'atmosfera defineixen les característiques climàtiques del planeta. Com intervenen els oceans en la regulació climàtica? Tant per la superfície



Figura 4. Copèpode del gènere *Labidocera*. Els copèpodes són els animals pluricel·lulars més abundants del planeta. La seva funció a les xarxes tròfiques va des de servir com a font d'aliment de peixos, fins al control de xarxes tròfiques microbianes mitjançant la depredació, i la contribució en la regeneració de nutrients.

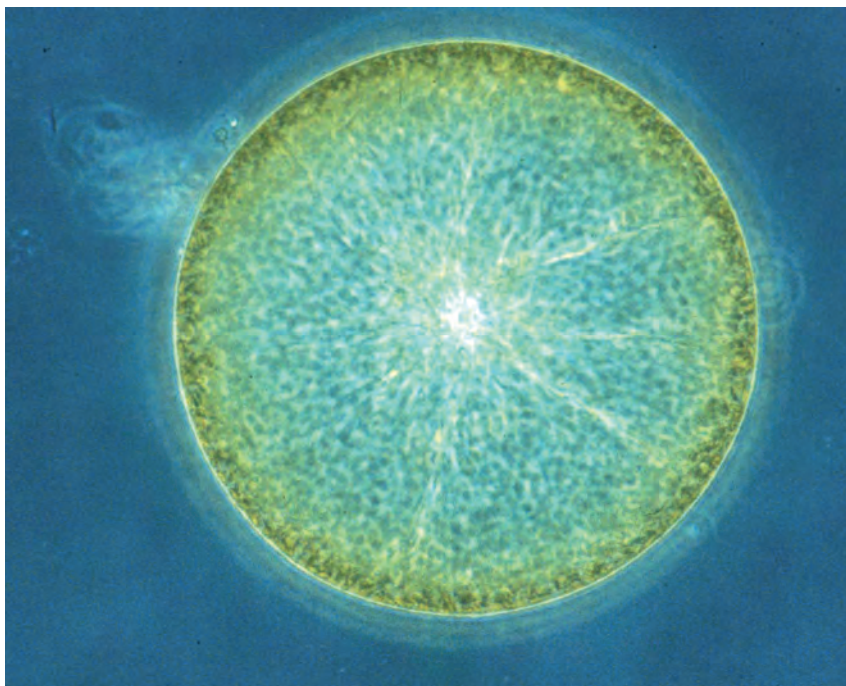
i massa que tenen (la major reserva d'aigua del planeta), com per les característiques fisicoquímiques de la mol·lècula d'aigua, els oceans tenen un paper fonamental en el balanç energètic de la Terra. Els oceans absorbeixen la calor més efectivament que la terra o el gel. A més, l'emmagatzemen millor que la terra, i l'alliberen més lentament (efecte esmorteïdor). La gran capacitat calorífica de l'oceà profund li dona un paper molt rellevant com a estabilitzador del clima terrestre o retardador dels efectes del canvi climàtic. Els corrents i l'efecte del vent poden transportar i redistribuir la calor cap als fons marins, on pot residir durant centenars d'anys. Això es reflecteix en l'augment de temperatura dels oceans, que també es comença a fer evident en la fondària. En aquest sentit, els corrents marins actuen com uns grans transportadors de calor i sals, i les fluctuacions en aquests corrents alteren la taxa segons la qual la calor es redistribueix al planeta, i això afecta el clima (Fig. 8).

Com pot afectar el canvi climàtic als oceans? Per exemple, la circulació oceànica es veu afectada per les variacions en la circulació atmosfèrica. El vent mou els corrents superficials dels oceans, a més de barrejar les aigües superficials i donar lloc a la capa de barreja i la termoclina. Canvis en el clima podrien afectar la periodicitat i la intensitat dels fenòmens d'afiorament, i tenir conseqüències importants en les grans pesqueries del planeta i en general en la productivitat de tot l'ecosistema marí. L'escalfament dels oceans pot comportar canvis en la direcció i intensitat dels corrents i afectar la distribució d'espècies marines. Alguns d'aquests canvis ja s'han començat a observar. En moltes zones dels oceans Atlàntic i Pacífic s'han detectat disminucions en les abundàncies de zooplàncton de les passades dècades que arriben a valors màxims del 80% a les costes de Califòrnia (Roemmich i McGowan 1995). En altres regions, per contra, s'han detectat lleugers increments en la biomassa zooplanctònica (Sheridan i Landry 2004). Bona part d'aquestes variacions atenen a canvis de distribució i substitució d'espècies i es relacionen amb una intensificació de fenòmens climatològics com *El Niño* i la NAO. Tanmateix, en termes més generals podríem dir que patim una tropicalització



Figura 5. Ciliat planctònic del grup dels tintínids. Els ciliats són membres destacats del microzooplàncton, i se'ls atribueix bona part de l'impacte d'aquest grup sobre els productors primaris.

Figura 6. Alga planctònica del gènere *Coscinodiscus*. Aquest gènere de diatomees inclou espècies de mida gran, visibles fins i tot a ull nu. Se les acostuma a trobar en gran nombre en zones molt productives de tots els ecosistemes.



de zones temperades amb la conseqüent invasió de noves espècies, procés ajudat, de vegades, pel transport d'organismes en l'aigua de llast de vaixells o per l'intercanvi d'espècies en aqüicultura. A escala local, els fenòmens de proliferacions

d'algues nocives cada cop són més freqüents, fruit d'una combinació de causes antropogèniques i climàtiques. En resum, estem experimentant una època de canvis a la qual el mar està responnent. Algunes d'aquestes respostes

tenen extensió cap a l'atmosfera mateixa i podrien, de fet, ralentir els efectes del canvi climàtic. És a dir, l'oceà té mecanismes per tamponar les alteracions i conservar la seva "estabilitat". Som tot just a les portes d'entendre aquests sistemes de retroalimentació. El més obvi és el que contempla la capacitat de segrestar CO_2 que té el mar, que redueix en aquest procés l'efecte hivernacle i afavoreix una disminució tèrmica. L'oceà és el segon reservori més important de carboni del planeta (després de les roques). Des d'un punt de vista purament químic l'intercanvi de CO_2 entre oceà i atmosfera dependrà de la pressió parcial de CO_2 ($p\text{CO}_2$) i estarà controlat per la temperatura, la salinitat i la intensitat del vent. Així doncs, sembla que per moltes centúries abans de la Revolució Industrial la $p\text{CO}_2$ es va mantenir estable al voltant del $280 \mu\text{atm}$, fet que suggereix un cert equilibri atmosfera-oceà. A partir de mitjan segle XIX, però, aquest equilibri es va trencar i la $p\text{CO}_2$ ha anat pujant fins al valor actual de $367 \mu\text{atm}$. Aquest increment és el resultat de l'augment d'emissions de CO_2 fruit de l'activitat antropogènica, del total de les quals un 46% romanen a l'atmosfera, un 30% són absorbides per l'oceà, i la resta van a reservoris no identificats (Pierre 2004). Aquest 30% segrestat per l'oceà no seria tal sense la mediació dels organismes del plàncton en el procés anomenat *bomba biològica*. Tal i com hem vist abans, el CO_2 entra en el cicle de la vida per mediació dels organismes fotosintètics que actuen en les capes superficials i il·luminades de l'oceà. El carboni del CO_2 circula per les xarxes tròfiques en forma de matèria viva o estructures de carbonat càlcic. Bona part d'aquest carboni torna a remineralitzar-se en forma de CO_2 , però una part és exportada cap a les profunditats de l'oceà, on una porció es remineralitzarà i la resta (menys d'un 1% de la matèria orgànica produïda) quedarà segrestada al sediment per milions d'anys.

No pensem, però, que aquest procés no té un preu. L'augment de la $p\text{CO}_2$ a l'oceà per equilibrar la pressió parcial de l'atmosfera està produint una acidificació (disminució de pH) del medi marí. Es preveu que aquest descens de pH afectarà, en un futur immediat (menys de 50 anys), els organismes amb esquelets calcaris (mol·luscs, coralls, etc.).

Un altre mecanisme, potser més curiós i complex, és el que contempla el cicle del sofre. Moltes algues planctòniques acumulen una substància en l'interior anomenada DMSP (propionat de dimetilsulfur). A causa de l'activitat de la llum ultraviolada, els virus i els depredadors les algues es trenquen i alliberen aquesta substància al mar, que és ràpidament convertida a DMS (dimetilsulfur)

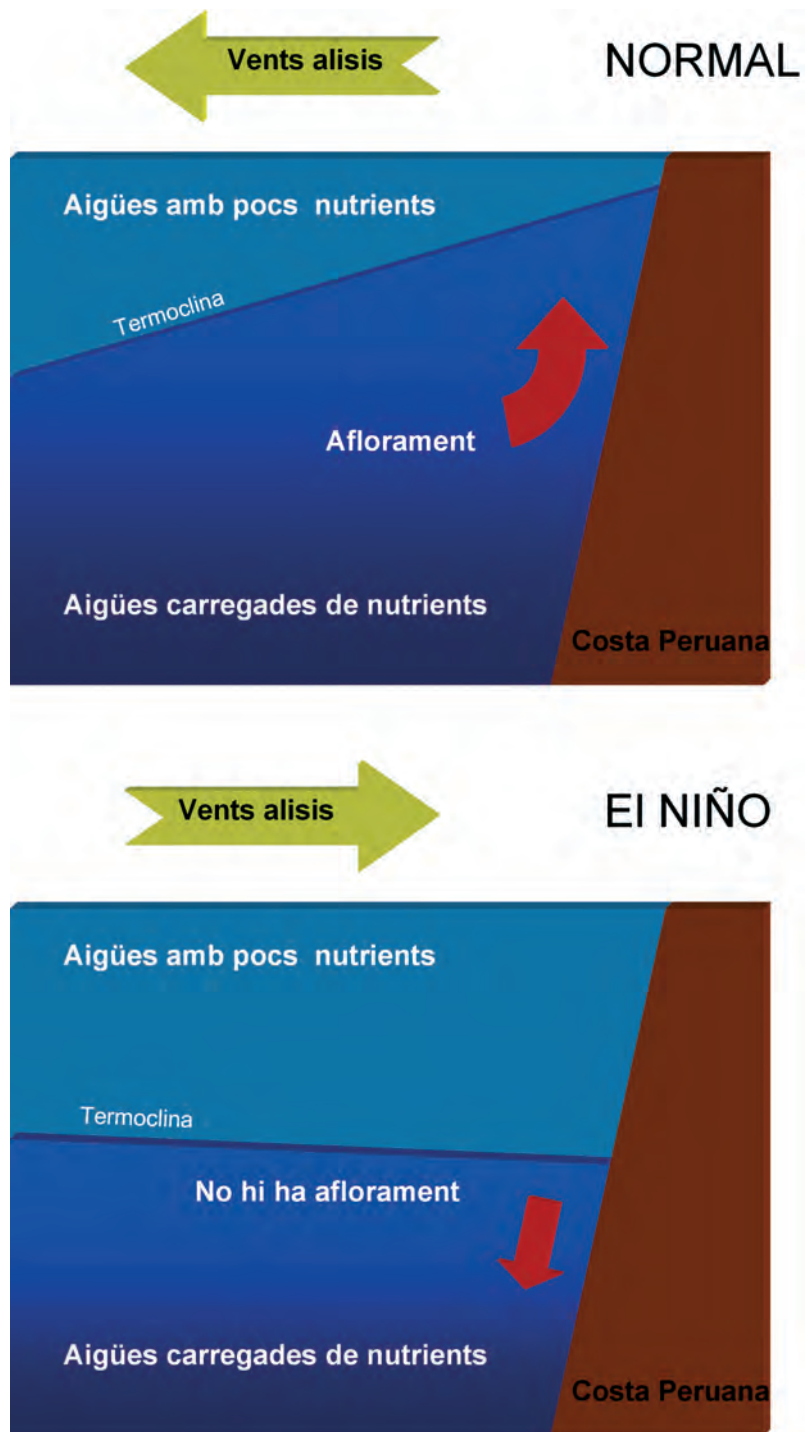


Figura 7. Representació esquemàtica dels efectes del fenomen de *El Niño* en l'aflorament de Perú. El dibuix mostra com en anys de *El Niño* (a baix) les aigües profundes carregades de nutrients no arriben a la capa fòtica, i s'interromp l'aflorament que es dona en condicions normals (a dalt).

per l'acció d'enzims (DMSP-liases) d'algues i bacteris (Simó 2001). Part d'aquest DMS pot escapar del mar per passar a l'atmosfera on s'oxidarà per formar partícules que reflecteixen la radiació solar o servirà de nucli de condensació de núvols. El resultat final és un increment de l'albedo del planeta amb la conseqüent disminució de la irradiància que arriba a la terra i de la temperatura global (Charlson *et al.* 1987). És a dir, un

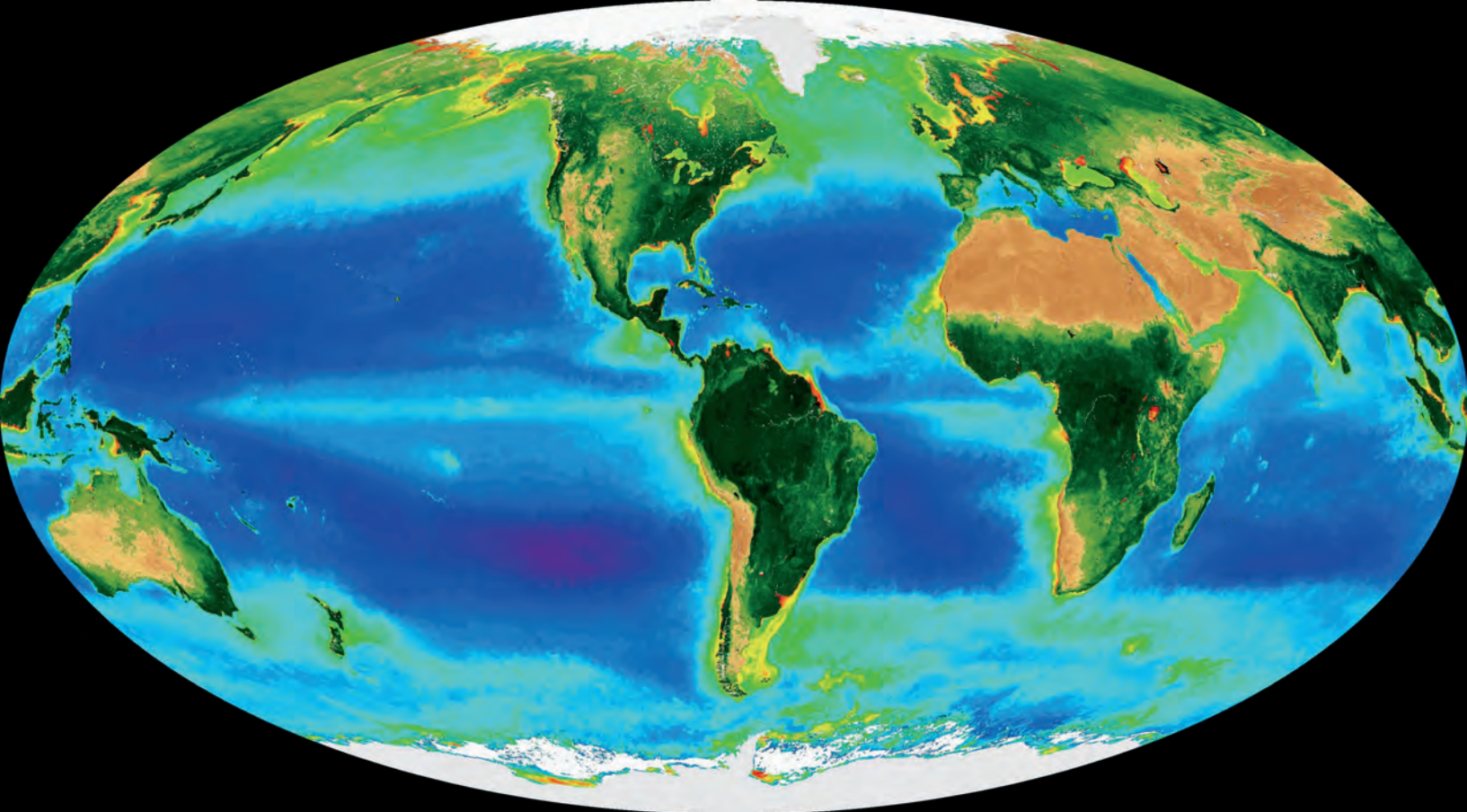


Fig.ura 8. El *conveyor belt* oceànic. La circulació termohalina dels oceans pot ésser representada de manera simple pel patró circulatori que es mostra a la figura, on s'indica en vermell les aigües superficials i en blau les profundes.

increment de la temperatura i la irradiància pot afavorir el creixement de les algues i l'alliberació de DMS a l'atmosfera, fet que a la llarga pot disminuir la temperatura, entrant en un bucle de retroalimentació negativa que encara no entenem ben bé del tot.

En resum, com hem vist, el mar es comporta com un organisme viu, que respira i respon, ja sigui localment o globalment, als forçaments als quals està sotmès. De si aquest ésser immens tindrà prou capacitat per contrarestar els canvis actuals en la climatologia del planeta o s'adaptarà modificant els òrgans interns (les xarxes tròfiques) i l'aparell circulatori (els corrents marins) només en podem fer especulacions i haurem d'esperar per tenir una resposta.

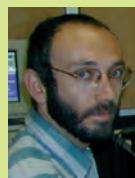
Bibliografia

- Calbet A., Landry M.R. (2004). Phytoplankton growth, microzooplankton grazing, and carbon cycling in marine systems. *Limnology and Oceanography* 49: 51-57.
- Charlson, R.J. and others (1987). Oceanic phytoplankton, atmospheric sulfur, cloud albedo and climate. *Nature* 326: 655-661.
- Chisholm S.W., Olson R.J., Zettler E.R. and others (1988). A novel free-living prochlorophyte abundant in the oceanic euphotic zone. *Nature* 334: 340-343.
- Greene C.H. and others (2003). Trans-Atlantic responses of *Calanus funmarchicus* populations to basin-scale forcing associated with the North Atlantic Oscillation. *Progress in Oceanography* 58: 301-312.
- Ñiquen M., Bouchon M. (2004). Impact of *El Niño* events on pelagic fisheries in Peruvian waters. *Deep-Sea Research II* 51: 563-574.
- Pierre, J.P. Marine biogeochemical cycles: Effects on climate and response to climate change. Dins de *Marine Ecology*, editat per C. Duarte (Ed.), dins d'Enciclopedia of Life Support Systems (EOLSS) UNESCO. Eolss Publishers, Oxford, UK. <http://www.eolss.net/eolss/>
- Roemmich D., McGowan J. (1995). Climatic warming and the decline of zooplankton in the California Current. *Science* 267: 1324-1326.
- Sheridan C.C., Landry M.R. (2004). A 9-year increasing trend in mesozooplankton biomass at the Hawaii Ocean Time-Series Station ALOHA. *ICES Journal of Marine Science* 61: 457-463.
- Sherr E., Sherr B. (1988). Role of microbes in pelagic food webs: A revised concept. *Limnology and Oceanography* 33: 1225-1227.
- Simó R. (2001). Production of atmospheric sulfur by oceanic plankton: biogeochemistry, ecological and evolutionary links. *Trends in Ecology and Evolution* 16: 287-294.



Albert Calbet Fabregat és llicenciat en Ciències Biològiques per la Universitat de Barcelona i doctor en Ciències del Mar per la Universitat Politècnica de Catalunya. La seva tesi se centrà en l'estudi de la producció zooplàntònica marina i es va dur a terme a l'Institut de Ciències del Mar (CSIC). Realitzà el seu postdoctorat a la University of Hawaii, on va aprofundir en l'estudi del microzooplàncton i la

dinàmica de les xarxes tròfiques marines. El 1999 tornà a Barcelona per incorporar-se a l'Institut de Ciències del Mar amb un contracte del Ministeri d'Educació i Cultura. Actualment gaudeix d'un contracte Ramón y Cajal del Ministeri de Ciència i Tecnologia.



Enric Saiz i Sendrós és doctor en Biologia per la Universitat de Barcelona i Científic Titular del CSIC. Ha dut a terme la seva investigació a l'Institut de Ciències del Mar de Barcelona (CSIC), a diversos centres dels EUA i a Dinamarca. La seva recerca avarca, en un sentit ampli, l'ecologia del zooplàncton marí. Els aspectes en què ha treballat més han estat els relacionats amb

l'alimentació, metabolisme, creixement i reproducció dels copèpodes, amb un enfocament multidisciplinari combinant ecofisiologia, etologia, bioquímica, física de petita escala, etc.

Més informació: <http://www.icm.csic.es/bio/projects/zootransfer>