



EL PAPER QUE JUGUEN ELS OCEANS EN L'EQUILIBRI DEL PLANETA TERRA

JOSEFINA CASTELLVÍ

Les diferents unitats geogràfiques, tant de terres emergides com de masses d'aigua, i els ecosistemes que cadascuna desenvolupa formen part d'una sola unitat: la Natura. Totes les seves estructures, ja siguin vives o inerts, estan interrelacionades amb un objectiu final que és el de mantenir l'equilibri natural.¹

Quan ens endinsem en l'estudi de la Natura, ens adonem que és un sistema continu i interrelacionat, de manera que qualsevol fenomen que es produeixi en una part es transmet directament o indirecta a la resta del sistema. Això fa que el conjunt sigui tan complex que en dificulta el coneixement, atesa la xarxa d'interconnexions que s'hi estableixen.

L'home, en el seu delit d'ordenar l'estudi dels sistemes naturals, ha arribat a definir una sèrie de compartiments estancs que li permeten el coneixement sistemàtic del seu contingut. Aquesta estructura no s'ajusta a la realitat de la Natura, però permet l'estudi profund i amb molt detall de cadascuna de les seves parts. D'aquesta manera ens anem aproximant a un coneixement estàtic d'un sistema que està contínuament evolucionant, però encara estem lluny de la comprensió del funcionament de la biosfera.

1. Aquest article és la transcripció de la lliçó inaugural que va obrir el curs actual a la Universitat Ramon Llull i que va ser pronunciada el dia 26 de setembre de 2005. Agraïm molt sincerament a l'autora i a la Universitat la seva autorització per publicar a la nostra revista aquesta conferència.

La Terra no està en equilibri físic. Té una dependència de la biosfera per mantenir les condicions especials que la vida requereix. El sòl, l'aigua i l'atmosfera han anat evolucionant durant milions d'anys mitjançant l'activitat de la biosfera. La Terra es veu envoltada per una xarxa vital formada per éssers vius, l'activitat dels quals condiona i és capaç de variar les característiques físiques i químiques del medi on es desenvolupen. Això fa que es mantinguin els cicles globals d'energia i matèria orgànica que estan en constant transformació. En realitat, l'home viu en un medi que és creat i mantingut en cada moment per la totalitat d'organismes que formen la biosfera.

Parlar de Natura és parlar d'equilibri. Totes les activitats de la biosfera estan incloses dins d'un marc d'equilibri general i el resultat final és que la suma de la respiració de tots els éssers vius és igual a la producció primària elaborada pels vegetals. És a dir, que l'anhídrid carbònic produït durant la respiració s'equilibra amb l'oxigen produït per la funció clorofil·lica.

Cada espècie, incloent-hi la humana, té un paper determinat dins el sistema natural que no és constant en el temps, sinó que evoluciona en harmonia amb l'evolució que tingui el sistema mateix. Es tracta d'un equilibri dinàmic.

Des de l'aparició de vida sobre la Terra fins a l'actualitat, les condicions ambientals han sofert canvis fonamentals. Exemple d'aquesta variació és la transformació d'una atmosfera reductora en l'actual, que té oxigen en abun-

dància. L'enriquiment en oxigen va ser produït per l'evolució de cèl·lules que van incorporar pigments fotosintètics i van tenir la capacitat de produir matèria orgànica aprofitant l'energia solar. Aquesta reacció, que comporta l'alliberament d'oxigen molecular a l'atmosfera, va tenir tant èxit que la composició de l'atmosfera va anar canviant. Davant d'aquest canvi tan significatiu, l'evolució va seguir el camí d'obtenir organismes aerobis, és a dir, capaços de respirar oxigen, en contraposició als anaerobis, que havien poblat el planeta fins aleshores.

Aquest exemple serveix per reflexionar sobre la plasticitat dels elements que integren la biosfera i la capacitat d'adaptació dels seus integrants. La Natura, per mantenir l'equilibri, sols necessita temps, i la biodiversitat, amb l'ajut de la selecció natural, fa la resta.

LA TEMPERATURA AMBIENTAL

Per mantenir aquest equilibri entre tots els éssers vivents i el mateix planeta cal que la temperatura ambiental oscil·li entre uns intervals que siguin compatibles amb la vida. A temperatures molt altes, i és quan es produeix la desnaturalització de les proteïnes, o a temperatures molt baixes, que és quan els sistemes enzimàtics són inoperants i la vida no es pot mantenir. Elements essencials que procuren l'equilibri climàtic de la Terra són l'atmosfera i els oceans. Ambdós són fluids de diferent densitat que actuen com embolcalls del planeta i, gràcies a la seva acció, la Terra manté una estabilitat tèrmica.

La Terra absorbeix radiació solar i, a la vegada, emet energia cap a l'espai, però aquestes dues accions no són homogènies segons els llocs que considerem. En les proximitats de l'equador, l'energia radiant que rep la Terra és molt superior a la que emet i això es manifesta en un escalfament de l'aigua dels oceans i de l'atmosfera. En canvi, a les regions polars passa el contrari: la

Terra emet més energia que la que rep del sol. Aquestes diferències de comportament a diferents latituds produeixen moviments dels fluids en direcció vertical i horitzontal que, a més, estan modificats pel moviment de rotació de la Terra. La resultant és una tendència a l'homogeneïtzació de la temperatura entre llocs que han rebut quantitats d'energia molt diferents.

El fet que la calor específica de l'aigua sigui molt elevada fa que els oceans tinguin una gran capacitat de retenir l'energia calorífica rebuda des del sol, sobretot tenint en compte que el 75% de la superfície del planeta està coberta pels oceans. El seu poder calorífic és unes mil vegades el de l'atmosfera, de manera que suposa un gran tampó que amorteix els canvis de temperatura. Més endavant veurem quins mecanismes desenvolupen els oceans per transferir l'energia retinguda a altres zones, incloses les terres emergides.

La relació de contacte íntim existent entre l'oceà i l'atmosfera és determinant per a una sèrie de fenòmens que tenen com a factor comú la transferència d'energia. Les masses d'aire experimenten modificacions notables quan passen per damunt de l'aigua del mar. Les parts inferiors de masses d'aire humides procedents del tròpic es refreden quan viatgen cap als pols per sobre d'aigües fredes, produint núvols baixos i boires abundants. Al contrari, masses d'aire fredes que provenen dels pols i viatgen vers l'equador, s'escalfen i es carreguen d'humitat quan travessen zones d'aigües calentes. Aquest escalfament es tradueix en un moviment ascendent de les masses d'aire que produeix núvols i pluges.

Sense cap dubte, els oceans formen la part fonamental del cicle hidrològic mundial que, sota l'efecte de l'energia solar, produeix cíclicament evaporació, precipitació, retenció d'humitat, etc. i en la qual es troba la base del sistema climàtic del planeta.

Els oceans, lluny d'estar constituïts per un gran cúmul d'aigua uniforme, tenen una estructura ben definida i molt complexa que, malauradament,

encara no coneixem del tot. Masses d'aigua ben diferenciades per la seva composició química i característiques físiques circulen pels espais oceànics sense barrejar-se amb altres i transportant en el seu si nutrients i energia que són fonamentals per a la síntesi de matèria orgànica que, en definitiva, és el primer graó de la cadena alimentària del sistema.

Entre molts altres mecanismes de transport, centrarem la nostra atenció en els corrents marins, com a integradors d'un sistema d'interacció oceà-atmosfera que intervé de manera decisiva en l'equilibri climàtic del planeta.

ELS CORRENTS MARINS

Hi ha corrents que són induïts pel vent. El seu abast és únicament superficial i la seva existència està íntimament lligada a la força del vent que desplaça la pel·lícula superficial d'aigua. La velocitat d'aquests corrents disminueix amb la profunditat i la seva direcció té una desviació cap a la dreta, l'hemisferi Nord, a causa de l'efecte de rotació del planeta (efecte Coriolis).

També hi ha corrents originats per altres causes, com són les diferències de temperatura i salinitat de les aigües. Són els corrents *termohalins*. Aquests corrents es caracteritzen per ser relativament lents, però comporten el desplaçament de grans volums d'aigua entre masses oceàniques de diferents densitats. El seu origen està relacionat amb les diferències d'energia solar i evaporació que es produeixen en les zones equatorials. La massa d'aigua que conforma el corrent desplaça quantitats molt importants d'energia tèrmica que, al llarg del seu recorregut, es va dissipant en favor de zones més fredes. El conjunt de l'acció d'aquests corrents causa un transport d'energia calorífica des de les zones tropicals, de màxima insolació, vers les zones polars que reben un *minimum* d'energia.

Exemples típics d'aquest tipus d'acció són els corrents del Golf i el corrent anomenat del *Niño*.

El corrent del Golf forma part del gran cinturó de corrents mundials. L'escalfament de l'aigua superficial, que manté una baixa densitat, s'origina al golf de Mèxic i, com un riu, travessa les masses oceàniques de l'Atlàntic Nord i passa fregant les costes d'Escandinàvia, que, atesa la seva latitud, són terres fredes. L'energia calorífica que transporta aquest corrent es va dissipant i transferint a les regions per les quals transcorre. Això fa que el clima sigui més benigne del que li correspondria pel lloc geogràfic que ocupa. A latituds de 60°N es troben grans boscos i activitats agrícoles productives que han permès l'assentament de civilitzacions pròsperes i l'establiment de ciutats com Oslo, Estocolm, Helsinki i d'altres que no trobem, a les mateixes latituds, a l'hemisferi Sud.

El refredament del corrent del Golf a les altes latituds provoca un augment de la densitat de l'aigua que fa que no es pugui mantenir en superfície i es desploma en forma de cascada cap al fons, fins que troba l'anomenat nivell de compensació, és a dir, el nivell per sobre del qual l'aigua és menys densa i per sota del qual l'aigua és més densa. Aquí segueix un llarg recorregut en profunditat que porta el corrent cap l'Atlàntic Sud i Índic i tanca el bucle tornant al golf de Mèxic. La forta insolació torna a disminuir la densitat de l'aigua i la fa emergir cap a la superfície.

El "motor" que mou aquesta cinta transportadora va lligat a la força de caiguda de l'aigua a la part més septentrional de l'Atlàntic Nord. Quan més intens és el refredament i, per tant, l'augment de la densitat de l'aigua, la caiguda cap al fons és més ràpida i la força d'arrossegament de tot el corrent augmenta. Per tant, la persistència del corrent del Golf depèn del fred que faci a les altes latituds de l'hemisferi Nord. Davant un canvi climàtic com el que actualment estem vivint i que es caracteritza per l'escalfament de la Terra, el corrent del Golf també se'n veu afectat. Els especialistes en dinàmica d'aigües ja han detectat una desacceleració d'aquest corrent.

Les zones àrtiques, sota la influència del canvi climàtic, han moderat les temperatures i això ha disminuït el poder de refredament de l'aigua i, per tant, la caiguda cap al fons es fa a menys velocitat i tot el mecanisme s'alenteix.

EL CORRENT DEL NIÑO

El corrent del *Niño* (anomenat així perquè es manifesta als voltants de Nadal) té un origen atmosfèric lligat a una caiguda dels vents alisis, que bufen d'est a oest sobre el Pacífic, provocada per una disminució de la diferència de pressions atmosfèriques entre el costat asiàtic i el costat americà de l'oceà. Sota aquesta acció, es produeix una desacceleració de l'aflorament d'aigües profundes en la costa de Perú i una invasió d'aigües superficials escalfades per la insolació equatorial. Això provoca sovint la mort del plàncton i dels animals i plantes del bentos que, en estar fixats sobre el fons marí, no poden evitar l'acció nociva de les aigües calentes que els arriben en progressar el corrent. L'establiment en superfície d'aquestes aigües calentes provoca un índex d'evaporació molt elevat, de manera que l'atmosfera es carrega de vapor d'aigua que sovint descarrega de manera dràstica sobre el continent americà.

Aquest corrent conegut com el *Niño* es definia originàriament com una invasió d'aigües calentes a les costes d'Equador, Xile i Perú. Després de més de vint anys de recerca intensiva, avui sabem que és un fenomen que afecta tot el planeta i que comença per una desestabilització del règim de corrents que circulen per les costes d'aquests països. El *Niño* no és més que la manifestació de la fase càlida de la variabilitat natural del sistema acoblat oceà-atmosfera a l'oceà Pacífic, que es caracteritza per anomalies de la pressió atmosfèrica a nivell del mar i de la temperatura superficial de les aigües. Aquesta fase es manifesta amb una periodicitat de 3 a 5 anys.

El *Niño* és el paradigma de la interacció entre la fase gasosa, la fase líquida i l'energia que arriba des del sol amb implicacions climàtiques generals. El seu efecte és capaç de pertorbar el clima tant d'Europa com del llunyà Orient i les repercussions són molt significatives sobre el clima de tot el planeta i afecten tant la circulació atmosfèrica en zones remotes com els corrents oceànics.

Es pot dir que actualment es coneixen relativament bé els corrents oceànics quant a la seva existència, el seu recorregut i, fins i tot, pel que fa referència al volum d'aigua transportat. El gran problema és el coneixement de les causes i la variabilitat que poden ser l'origen d'alteracions climàtiques, no sols en el mar, sinó també en terres emergides.

S'està fent un esforç considerable de coordinació internacional tant pel que fa referència a les observacions de satèl·lit com pel que fa a la instal·lació de boies en tots els oceans que obtenen dades indispensables per a l'estudi del fenomen.

Tots aquests processos posen de manifest l'estreta relació existent entre l'oceà i l'atmosfera, però val la pena insistir en la influència que existeix entre els fenòmens oceànics i la climatologia de les terres emergides. Parlant del *Niño* s'ha fet esment dels episodis de pluja intensa sobre els països costaners d'aquest corrent a causa de la circulació ascendent d'una atmosfera carregada d'humitat. A vegades, l'efecte oceà-terra és de signe contrari. Vegem-ne un exemple.

L'aigua profunda dels oceans que està en contacte directe amb els fons oceànics és una aigua freda i molt rica en sals nutritives, ja que està en contacte amb el fons marí, lloc on es produeix massivament l'oxidació de la matèria orgànica. Com a conseqüència del cicle vital de les espècies que viuen en el si de les masses d'aigua, es van produint éssers morts i deixalles orgàniques que cauen al fons en forma d'una pluja constant de matèria orgànica que és aprofitada per les poblacions de microorganismes, que fan la regeneració dels elements nutritius. Però aquesta aigua profun-

da, de gran potencial productiu, està sotmesa a la foscor de les profunditats i no desenvoluparà les poblacions fotosintètiques fins que algun mecanisme la porti a la zona il·luminada.

L'aigua profunda empesa pel moviment de rotació de la Terra té un moviment constant d'oest a est. Considerem el cas de l'Atlàntic Nord. Després de travessar tot l'Atlàntic arriba un moment que xoca amb el continent africà i s'enfila pel talús continental fins a arribar a la superfície, just a les costes de la terra emergida. Aquest fenomen és l'anomenat "aflorament" i va lligat a una gran producció de fitoplàncton que continua amb zooplàncton, animals planctòfags, etc. Són zones molt riques que l'home explota per la seva abundància en pesca.

Aquesta aigua profunda que l'aflorament porta fins la superfície és freda, de manera que, en contacte amb l'atmosfera, provoca una circulació descendent amb absència total d'evaporació. En aquest cas, l'atmosfera és molt seca i no es formen ni núvols ni boira i, per tant, no plou. Heus aquí l'origen i manteniment del desert del Sàhara. Tots els deserts que estan en la costa oest dels continents tenen com a origen els afloraments oceànics.

LES REGIONS POLARS

A més dels corrents marins, la Natura ha desenvolupat altres mecanismes relacionats amb els oceans que tenen efectes amb conseqüències directes sobre la regulació de l'energia que ens arriba del sol.

L'existència de zones de la superfície marina que temporalment es gelen té la seva transcendència dins l'encaix de l'equilibri climàtic del planeta Terra. Majoritàriament, per la seva extensió, les regions polars són les que juguen un paper important i, concretament, el major efecte està lligat al pol Sud.

L'oceà Glacial Antàrtic, format per la unió dels oceans Atlàntic, Pacífic i Índic, representa el 20% de la superfície aquosa del planeta. En el centre d'aquesta gran massa d'aigua apareix

l'Antàrtida, amb un aïllament total pel que fa referència a altres terres emergides. Aquesta particular disposició li confereix característiques climàtiques singulars.

La imatge de l'Antàrtida vista des de l'espai canvia segons l'època de l'any. A l'hivern, els seus 14 milions de Km² resten empresonats dins d'un anell de gel marí (banquisa) que, sense solució de continuïtat amb el gel continental, es perllonga mar endins en amplituds mitjanes de 1000 Km. En aquesta situació hivernal, la superfície del gel queda augmentada en uns 20 milions de km². Aquest creixement de la superfície sòlida, que aparentment sembla banal, té una gran influència ecològica.

Atesa la concentració salina de l'aigua de mar, la seva congelació es produeix al voltant de -2,5°C. Pel fet que l'aigua té la característica que la seva màxima densitat no correspon amb el punt de congelació, en baixar la temperatura es va congelant la superfície del mar, que assoleix gruixos d'alguns metres que, en realitat, actuen d'aïllant tèrmic, ja que el gel és un molt mal conductor de la calor. D'aquesta manera, la flora i la fauna marina no es veuen afectades pels grans freds hivernals i segueix el seu cicle biològic en un ambient que mai no es troba per sota dels -2,5°C.

Les espècies de flora i fauna marina que viuen en aquest ambient queden temporalment protegides dels seus depredadors naturals. Per sota del gel, la il·luminació és molt tènue, però suficient perquè les algues adaptades a aquestes condicions de vida puguin continuar els seus cicles vitals.

En arribar la primavera, la banquisa s'aprima per fusió de l'anell de gel i es trenca en trossos més o menys grans que es deixen emportar pels corrents fins a la seva fusió total. Les espècies adherides a aquestes plataformes es van lliurant al medi a mesura que la fusió del gel avança, i segueixen el seu cicle en el medi líquid.

A l'estiu, la imatge que ofereix el conjunt del continent és la de reducció de la superfície gelada, de manera que el perímetre és el de les costes de

la terra emergida i el de les barreres perpètuas que no es fonen mai i que representen el 10% de la superfície antàrtica.

Des del punt de vista energètic, aquesta regió és la més activa del planeta. Cada any, en aproximadament cent dies, es produeix la formació i després la fusió d'uns 20 milions de km² de gel.

CONSEQÜÈNCIES DE L'EXISTÈNCIA DE LA "TACA BLANCA"

Vegem les conseqüències que té l'existència d'aquesta "taca blanca" centrada en el pol Sud en l'equilibri climàtic del planeta.

Durant el moviment d'expansió hivernal, al mateix temps que el creixement de la superfície gelada, es produeix també un refredament progressiu del continent, en un procés que s'alimenta a si mateix. D'una banda, el sistema perd energia, ja que l'increment de la superfície blanca, la puresa de l'atmosfera i la pobresa de vapor d'aigua provoquen un augment en la reflexió de l'energia solar. De l'altra, en augmentar el diàmetre del casquet gelat, les regions centrals cada vegada estan més lluny del focus calorífic representat per les aigües subantàrtiques dels oceans que han estat escalfades a les zones tropicals.

Segons l'estació de l'any que es consideri, aquest fenomen de refredament pot ser més o menys exagerat però, en qualsevol cas, el balanç energètic d'aquesta regió del planeta és sempre negatiu. Com a conseqüència d'aquest fet es produeix, de manera constant, un desplaçament d'energia des de les baixes latituds que influeix, de manera decisiva, en la regulació tèrmica del planeta i, en definitiva, en les seves condicions climatològiques.

Els intercanvis d'energia entre l'oceà i l'atmosfera estan estretament lligats a l'extensió de la coberta de gel marí, de manera que la seva dinàmica és un element essencial en el sistema de regulació del clima.

Com a conseqüència d'un augment general de temperatura es pot produir una reducció de l'extensió de la superfície gelada del mar que envolta el continent antàrtic. La disminució de la superfície de reflexió es tradueix en un augment de l'absorció d'energia. D'altra banda, en aquesta situació, una major superfície líquida dels oceans queda exposada al contacte atmosfèric i augmenten, per tant, la pèrdua de calor, l'evaporació i la dissipació d'anhidrid carbònic que els processos biològics han generat en els ecosistemes marins. La formació de núvols juga un paper important en el balanç total de l'intercanvi energètic entre l'oceà i l'atmosfera. Una reducció de la superfície gelada i un augment del flux de vapor d'aigua vers l'atmosfera pot provocar la formació de núvols baixos que es tradueix en una reducció de la quantitat de radiació solar que arriba a la superfície terrestre.

La resultant d'aquest polinomi amb elements de diferent signe no és senzilla d'obtenir però, en definitiva, és el que defineix l'amplitud de la variació climàtica.

La dinàmica de les masses d'aigua oceànica també es veu influïda pel balanç entre l'energia rebuda i la reflectida. Sobre el continent antàrtic sovint es produeixen inversions tèrmiques de l'atmosfera. En aquestes situacions, la massa d'aire fred i dens es trasllada des del centre a les parts baixes del continent seguint les valls de les glaceres i accelerant-se a mesura que arriba a cotes més baixes. Aquest és l'origen del vents catabàtics que arriben a velocitats de 300 Km/h. Sota la seva influència, la neu superficial és arrossegada i forma dunes de fins a un metre d'alçada que dona una imatge molt característica al paisatge. Quan aquests vents arriben a la costa, bufen cap al mar i produeixen un refredament considerable de l'aigua superficial, que augmenta bruscament de densitat i es desploma cap al fons fins a trobar el seu nivell de compensació.

Aquest fenomen es produeix en tots els mars que envolten l'Antàrtida, però en el mar de

Weddell adquireix grans proporcions i origina “l'aigua antàrtica profunda” que, en forma de corrent marí, s'integra al circuit global de corrents termohalins del planeta. Aquesta aigua, de característiques físiques i químiques molt singulars, es pot trobar a diferents profunditats a tots els oceans del món, fins i tot a l'hemisferi Nord.

El coneixement del medi ambient del planeta i dels fenòmens a gran escala va lligat a l'estudi de processos multidisciplinars que es desenvolupen en el sistema “atmosfera-terra-oceà” i que tenen com a principal protagonista les interaccions entre les diferents fases.

Posar ordre dins la complexitat intrínseca del sistema ha estat un dels grans resultats d'aquesta recerca en els darrers deu anys. Per exemple, ens ha permès distingir entre la variabilitat natural del clima i la variabilitat induïda per l'acció antropogènica. La complexitat dels sistemes naturals no són un pretext científic, sinó una característica que hem d'acceptar i no intentar evitar.

S'ha avançat prou en el coneixement dels processos i de les interaccions i influències mútues per saber que la simplificació excessiva i el reduccionisme no ens porten al coneixement de l'essència del procés sinó a visions distorsionades amb repercussions posteriors molt diverses.

En la gestió mediambiental hem d'avançar vers un plantejament nou, més científic, global i multidisciplinar que, progressivament, recolzi en els sistemes independents d'avaluació de la qualitat. Sols així assolirem una base sòlida per a la presa de decisions polítiques i administratives que afecten el medi ambient del planeta.

JOSEFINA CASTELLVÍ I PIULACHS (Barcelona, 1935) és doctora en Ciències Biològiques i oceanògrafa, especialista en microbiologia marina. Ha dut a terme una important tasca investigadora, vinculada a l'Institut de Ciències del Mar del CSIC. A partir del 1984 va participar, d'una manera rellevant, en l'organització de la recerca a l'Antàrtida, i va col·laborar en la instal·lació de la Base Antàrtica Espanyola Joan Carles I a l'illa Livingston.