



COM CANVIARÀ EL CLIMA?

CANVIS CLIMÀTICS RÀPIDS: L'ESCALFAMENT DE L'ATMOSFERA ENS POT PORTAR A CONDICIONS GLACIALS?

Josep Enric Llebot

■ ELS INICIS MITOLÒGICS I L'ALBOR DE LA CLIMATOLOGIA ACTUAL

Faetont, un dels nombrosos fills d'Hèlios, el Sol, en conduir sense cap experiència la quàdriga que cada dia el seu pare dirigia amb força i precisió pel firmament portant llum i calor a la Terra, no va poder evitar que els poderosos cavalls, en veure's lliures de la ferma mà del déu, s'atansessin massa a la Terra i produïren la dessecació de mars i rius i incendis en nombroses zones boscoses.

Aquest primer canvi climàtic mitològic que Zeus va evitar que assolís dimensions completament desastroses per a la vida a la Terra enviant un raig mortífer que matà l'impetuós adolescent serveix d'il·lustració d'allò que s'ha esdevingut durant la història geològica de la Terra i de premonitòria advertència d'allò que pot donar-se en l'esdevenidor climàtic immediat. Els canvis en l'activitat del Sol i les variacions de les característiques de l'òrbita de la Terra al voltant de l'astre rei han determinat les oscil·lacions climàtiques periòdiques dels darrers milions d'anys entre períodes freds i càlids, però recentment la mà inexperta de la humanitat, que no pot controlar l'impacte de les seves activitats sobre l'ambient, pot induir a canvis del clima.

Fa poc més de cent anys, l'any 1896, el químic i físic suec Svante Arrhenius (Weart, 2003) es plantejà com a possible causa de les glaciacions el contingut canviant de diòxid de carboni de l'atmosfera. Arrhenius féu prediccions de quant s'escalfaria o refredaria l'atmosfera si la concentració de CO₂ augmentava o disminuïa i interpretà (Arrhenius, 1896) el possible escalfament de la Terra de forma positiva, ja que si la temperatura de l'atmosfera augmentava, el

clima dels països nòrdics es faria més suau i potser alguns cultius productius podrien conrear-se en indrets on aleshores no era possible.

La percepció actual d'aquesta qüestió en alguns aspectes és completament anàloga a la que s'imaginava Arrhenius. Tot i que majoritàriament és la generació i l'ús de l'energia la que produeix l'emissió a l'atmosfera de diòxid de carboni, hi ha una munió d'altres gasos que s'emeten també a l'atmosfera com a conseqüència dels canvis en els usos del sòl, la deforestació, determinats processos industrials i agrícoles, que una vegada a l'atmosfera canvien les propietats d'absorció d'energia d'aquesta i, per tant, el balanç energètic del planeta. També encara hi ha persones que com Arrhenius veuen aquests canvis en la composició atmosfèrica com a positius o, en qualsevol cas, com a irrellevants per a l'entorn ambiental de la Terra. Fa poc menys d'un any el president de Rússia, Vladímir Putin manifestava, repetint probablement sense saber-ho allò que un segle abans deia l'Arrhenius, que l'escalfament de l'atmosfera era positiu per a Rússia, ja que la població hauria d'usar menys roba d'abric i el conreu de cereals augmentaria; i poc abans el president George Bush manifestava també

que ell no veu preocupant l'impacte immediat sobre el clima de l'ús massiu, generalitzat i creixent dels combustibles fòssils com a font d'energia, comparat amb l'impacte econòmic que produiria la transformació de l'espectre energètic de la societat moderna.

Hi ha una idea generalitzada, moltes vegades no explicitada, que qualsevol canvi del clima està caracteritzat per una escala de temps molt llarga i que si la causa que el produeix és el vessament lent i continu de gasos a l'atmos-

**«FA POC MENYS D'UN ANY
EL PRESIDENT DE RÚSSIA,
VLADÍMIR PUTIN MANIFESTAVA,
REPETINT PROBABLEMENT SENSE
SABER-HO ALLÒ QUE UN SEGLE
ABANS DEIA ARRHENIUS, QUE
L'ESCALFAMENT DE L'ATMOSFERA
ERA POSITIU PER A RÚSSIA,
JA QUE LA POBLACIÓ HAURIA
D'USAR MENYS ROBA D'ABRIC
I EL CONREU DE CEREALS
AUGMENTARIA»**



© Il·lustracions: Carme Lorente

Figura 1. Els efectes de l'escalfament global es poden detectar a casa nostra a partir de canvis fenològics (Peñuelas i altres, 2002) en la planta. Hi ha exemples de floració avançada a la columna de l'esquerra: a dalt, *Papaver roheas* (rosella) i a baix, *Laurus nobilis* (llorer). A la columna del mig, exemples de sortida de fulla avançada: a dalt, *Aesculus hippocastaneum* (castany d'índia) i baix *Crataegus monogynia* (espinalb). A la columna de la dreta, exemples de fructificació avançada: a dalt, *Punica granatum* (magraner) i a baix, *Prunus domestica* (prunera).

fera, la resposta d'aquesta serà també contínua i lenta i, per tant, la societat i els ecosistemes tindran temps d'adaptar-se als canvis. L'anàlisi de les evolucions dels climes del passat posa en dubte aquest pensament quan es veu que hi ha hagut canvis climàtics durant la història recent de la Terra que s'han donat en qüestió de pocs anys.

Els productors i els guionistes de la pel·lícula *The day after tomorrow* varen agafar la idea de canvis climàtics ràpids per confeir una història d'aventures que, a partir d'una impossible tempesta de fred, mostrava com, paradoxalment, l'escalfament de l'atmosfera podria portar algunes zones del planeta a condicions semblants a les de la darrera glaciació. En aquest article el que es pretén és, justament, aportar una visió breu de quines bases donen suport a la possibilitat de canvis climàtics que es donin en escales de temps de l'ordre d'una o dues dècades en la situació actual del clima a la Terra.

■ QUÈ DIU LA CIÈNCIA OFICIAL SOBRE EL CANVI CLIMÀTIC?

Moltes coses referides a l'escalfament global són ben conegudes. Des de l'adveniment del període industrial, la necessitat d'energia intensiva ha propiciat l'ús dels combustibles fòssils, carbó, petroli i gas natural per al proveïment d'energia elèctrica i per al funcionament de les màquines i dels sistemes de transport. Quan aquests combustibles es cremen resten els productes de la combustió, que solen acabar a l'atmosfera, i entre aquests hi ha el diòxid de carboni. Aquest gas, d'altra banda present a l'atmosfera terrestre de forma natural en concentracions molt petites de l'ordre de 280 ppm (parts per milió) al començament de la revolució industrial, és present també a les atmosferes d'altres planetes del sistema solar en concentracions diverses i és objecte d'estudi per la ciència especialment pel que fa als dos planetes més pròxims a la Terra, Venus i Mart.

Des de fa força temps se sap que el CO₂ té fortes bandes d'absorció en la zona infraroja de l'espectre electromagnètic, és a dir, en la regió on la terra emet radiació com a conseqüència de l'escalfament produït

per l'absorció de la llum del Sol. Això és la base de l'anomenat efecte d'hivernacle, ja que per analogia l'atmosfera funciona de la mateixa manera que un hivernacle: l'atmosfera absorbeix molt poc la radiació solar procedent del Sol, mentre que, en canvi, absorbeix la radiació emesa per la Terra retenint-hi energia i per tant escalfant-se. Per això, la temperatura mitjana a la superfície terrestre és d'uns 15° C en comptes dels -18° C que hi hauria si l'atmosfera fos transparent a tot tipus de radiació. L'ús massiu dels combustibles fòssils augmenta contínuament i fa que cada vegada hi hagi més diòxid de carboni a l'atmosfera, tot i que, a l'engròs, no s'ha alterat pràcticament la composició atmosfèrica, ja que en un 99% segueix formada per

nitrogen, oxigen i argó. Tot i així, a finals de l'any 2003 la concentració de CO₂ a l'atmosfera va ser de 375 ppm, una concentració un 34% més gran que en períodes preindustrials i que resulta en un augment de la capacitat de retenció energètica que sembla que es comença a manifestar en la variació de la temperatura superficial mitjana. El diòxid de carboni no és l'únic gas que produeix l'efecte d'hivernacle, però sí que és el que produeix una major retenció d'energia a l'atmosfera, ja que la seva concentració és major que la d'altres gasos anomenats també gasos efecte d'hivernacle, com el metà, l'òxid nítrós, l'hexafluorur de sofre, els halocarburs, etc. La major part d'aquests gasos són emesos a l'atmosfera com a resultat de les

activitats humanes i la major part augmenten gradualment la seva concentració atmosfèrica. N'hi ha alguns, com ara halocarburs i alguns compostos de sofre, que, com a resultat dels acords internacionals, redueixen la seva presència a l'atmosfera, però són una minoria.

Si bé està fora de dubte l'augment de gasos efecte d'hivernacle a l'atmosfera, com es constata de les mesures que realitzen múltiples observatoris de tot el globus, els efectes que produeix una major concentració d'aquests gasos a l'atmosfera no són directes, sinó que s'han d'estudiar a partir de considerar el complex funcionament de l'atmosfera, els oceans i la biosfera, juntament amb els canvis periòdics que experimenta l'energia que arriba del Sol i, el que també és molt

«LA PEL·LÍCULA “THE DAY AFTER TOMORROW” AGAFA LA IDEA DE CANVIS CLIMÀTICS RÀPIDS PER CONFEIR UNA HISTÒRIA D'AVENTURES QUE, A PARTIR D'UNA IMPOSSIBLE TEMPESTA DE FRED, MOSTRAVA COM, PARADOXALMENT, L'ESCALFAMENT DE L'ATMOSFERA PODRIA PORTAR ALGUNES ZONES DEL PLANETA A CONDICIONS SEMBLANTS A LES DE LA DARRERA GLACIACIÓ

important, amb l'evolució de la societat tant pel que fa a les emissions com pel que fa a la tecnologia. Durant el mes d'agost de 2004 l'Agència Europea del Medi Ambient ha publicat un treball que posa de relleu els impactes que s'albira que pot produir el canvi climàtic per a la Unió Europea (EEA, 2004). Les dades més rellevants són que per l'any 2100 es preveu que la concentració de diòxid de carboni oscil·li entre 650 i 1.215 ppm, que la temperatura mitjana a la UE podrà augmentar entre 2,0° i 6,3° C, que la precipitació al nord d'Europa augmentarà al voltant d'un 1% per dècada i, en canvi, al sud d'Europa la precipitació disminuirà un 1% cada deu anys, que els estius molt càlids seran més freqüents i que els hiverns molt freds desapareixeran cap a final de segle, que el nivell del mar creixerà regularment durant segles, conseqüència sobretot de la dilatació de l'aigua del mar i de la fusió dels gels continentals, que moltes espècies marines i terrestres i zooplàncton s'aniran desplaçant cap al nord, cercant aigües més fredes i ambients més freds en general, que el període de creixement de la biomassa es fa cada vegada més llarg, que hi haurà zones a Europa que tindran problemes amb la disponibilitat de suficients recursos hídrics i, a la vegada, es podran produir inundacions més freqüents, que hi haurà canvis substancials en la producció de les collites i en la propagació de plagues i malalties, que hi haurà impactes adversos en la salut especialment relacionats amb les onades de calor, etc. Malgrat la publicació recent d'aquest informe, conceptualment no afegeix informació nova a la que periòdicament publica l'IPCC¹.

■ ELS CANVIS CLIMÀTICS, HAN ESTAT SEMPRE LENTS?

Té sentit qüestionar el punt de vista que manté que tots els canvis climàtics que s'han donat en el passat han estat lents, és a dir, s'han donat en escales de temps de l'ordre de milers d'anys? Així són els canvis

associats amb les variacions lentes de l'energia del Sol rebuda a la Terra produïdes per les variacions periòdiques de les característiques de l'òrbita de la Terra al voltant del Sol: la precessió, l'excentricitat de l'òrbita i l'angle de l'eix terrestre amb el pla de l'òrbita (Milankovítx, 1920).

Durant els anys noranta s'ha millorat molt la capacitat d'anàlisi de les dades que s'obtenen a partir de mostres de gel i de sediments en diferents jaciments distribuïts arreu del món i que aporten indicis geològics sobre com ha canviat el clima al llarg del temps geològic. Aquests registres indiquen que també hi ha hagut períodes en què el clima ha experimentat varia-

cions ràpides, és a dir, que en el decurs d'una o dues dècades la temperatura superficial de l'aire ha variat de l'ordre d'una o dues desenes de graus o les precipitacions s'han doblat (Alley, 2002). Així, el planeta ha experimentat en el passat grans canvis entre períodes glacials i períodes interglacials. Durant la darrera glaciació i durant el període de transició fins al clima actual, que abasta uns 15.000 anys, s'han produït alguns episodis que corresponen a canvis del clima ràpids, la qual cosa ha induït el seu estudi per tal d'esbrinar-ne les causes i, mirant cap al futur, saber si els mecanismes que els varen propiciar es poden donar en l'actual procés de canvi de les

condicions ambientals fruit de les activitats humanes i, per tant, el futur climàtic immediat pot conduir a situacions semblants a les que s'han donat en el passat.

Un canvi climàtic es pot considerar ràpid quan el clima varia de forma global a causa d'una pertorbació que supera un cert llindar i que desencadena una transició fins a una nova situació d'equilibri del sistema climàtic que es produeix amb una rapidesa superior a la dinàmica d'evolució de la causa. Una de les causes possibles d'algun dels canvis climàtics ràpids que s'han donat en el passat és la variació de la temperatura de l'atmosfera. Així l'escalfament de l'atmosfera produeix la fusió parcial dels gels polars que en condicions més fredes romanen congelats. Les masses de

«LES MASSES DE GEL CONTINENTAL, QUAN ES FONEN I ARRIBEN AL MAR, DISMINUEIXEN LA SALINITAT DE L'AIGUA, I PODEN PRODUIR EN POC TEMPS VARIACIONS SUBSTANCIALS DEL PATRÓ DE CIRCULACIÓ DE L'AIGUA SUPERFICIAL I PROFUNDA DEL MAR I, PER TANT, TAMBÉ DEL CLIMA ARREU DEL GLOBUS»

1. Panell Intergovernamental pel Canvi Climàtic, grup de treball creat pel programa de medi ambient de les Nacions Unides i per l'Organització Meteorològica Mundial (OMS) que reuneix experts de tot el món que periòdicament publica informes sobre l'estat del coneixement del problema del canvi climàtic. El més recent es va publicar l'any 2001: *Climatic Change 2001: IPCC Third Assessment Report*, Cambridge University Press (<<http://www.ipcc.ch>>).



© Il·lustració: Carme Lorente

La *Dryas octopetala* de la figura dona nom a l'anomenat *Younger dryas*, el canvi climàtic sobtat que es va produir fa 12.800 anys.

gel continental, quan es fonen i arriben al mar, disminueixen la salinitat de l'aigua i poden produir en poc temps variacions substancials del patró de circulació de l'aigua superficial i profunda del mar i, per tant, també del clima arreu del globus. La complexitat de les interrelacions entre tots els sistemes que caracteritzen el clima, que li configuren una alta no linealitat, pot ser la causa de canvis climàtics ràpids, però també poden induir que sigui molt difícil atribuir a una única causa un canvi important en les propietats del clima de la Terra.

■ LA DRYAS OCTOPETALA I LES EVIDÈNCIES D'ALGUNS CANVIS CLIMÀTICS RÀPIDS

El canvi climàtic ràpid més estudiat del passat és l'anomenat Younger Dryas (Llebot, 2003) que es va donar quan l'escalfament de l'atmosfera terrestre característic d'una època de transició entre un període glacial i el període interglacial actual es va interrompre sobtadament fa 12.800 anys, de tal forma que les condicions ambientals varen tornar a ser durant un miler d'anys les del període glacial ante-

rior fins que, també de forma ràpida, fa uns 11.600 anys es va recuperar el ritme d'escalfament anterior. Aquest episodi de la història climàtica de la Terra se segueix bastant bé a partir dels registres de gel, ja que la comptabilització de les capes de glaç permet determinar la durada i la rapidesa dels canvis amb un error en la datació dels registres molt petit, de l'ordre de l'1%. Les cales de gel s'han extret a Groenlàndia, tot i que també hi ha dades corresponents a jaciments de gel i de sediments al Canadà, Bolívia, Perú i l'Antàrtida. Aquestes dades indiquen que el refredament ràpid es va produir, aproximadament, en tres etapes d'uns deus anys cadascuna, mentre que l'escalfament al final de l'episodi (fa uns 11.600 anys) es va donar amb un augment de la temperatura d'uns 8° C també en uns deu anys. Però la temperatura no és l'única dada climàtica disponible sobre aquest episodi. La taxa d'acumulació de neu durant la fase d'escalfament es va doblar en tres anys, tot i que la major acumulació es va produir en un any. Aquest procés està relacionat amb els canvis en l'aflorament de l'aigua del mar impulsat pel vent en una conca veneçolana, que també es va donar en uns

HOME I CLIMA



UN TAST DE CANVI GLOBAL

CÈLIA MARRASÉ

I JOSEP ENRIC LLEBOT (EDITORS)

Treballs de la Societat Catalana de Biologia,
vol. 54, 2003.

El professor Ilya Prigogine, guardonat l'any 1977 amb el premi Nobel pels seus estudis sobre termodinàmica de no equilibri escrivia referint-se a les ciències ambientals: “Assistim a l'emergència d'una ciència que no es limita solament a situacions simplificades, idealitzades, sinó que ens col·loca davant la complexitat del món real. Una ciència que permet a la creativitat humana veure's com l'expressió singular d'un tret fonamental comú a tots els nivells de la natura”.

D'aquesta cita de Prigogine podem agafar dues idees: l'emergència d'una ciència que es col·loca davant de la complexitat del món real, natural i social, i la menció a la creativitat humana. Aquesta segona, la creativitat humana, és la font de la civilització, és la causa per la qual el món és com és i també és el motiu i l'origen del canvi global. Justament el volum 54 recentment publicat dels *Treballs de la Societat Catalana de Biologia* es dedica al canvi global amb un títol, *Un tast de canvi global*, que mostra que els editors reconeixen l'amplitud de la temàtica i que, per tant, no pretenen en poc més de cent pàgines abastar-la tota.

Sovint s'assimila el concepte de canvi global al del canvi climàtic. Probablement de tots els factors que influeixen sobre el canvi global, el canvi climàtic n'és el menys significatiu. De fet, tot i que la separació de la influència humana de la natural encara és un tema per resoldre, els canvis dels sistemes biofísics són petits comparats amb els canvis socials. En aquest sentit el volum que comentem és especialment privilegiat, ja que comença amb un dels darrers articles publicats, si no l'últim, del recentment traspassat professor Margalef on justament l'admirat ecòleg fa una breu reflexió: “De com la civilització modifica l'entorn i accelera la dinàmica d'una evolució global amb inversió de la topologia original dels espais continentals humanitzats”. Margalef parla de la domesticació urbana del paisatge i de la conveniència de disposar de models generalitzables d'aquest procés que permetin gestionar-lo adequadament.

A banda de l'article inicial, la resta de textos del volum es dediquen més al sistema biofísic. En el segon article el físic Josep Enric Llebot presenta una visió afinada sobre els canvis climàtics ràpids, un tema que darrerament ha aparegut al coneixement públic gràcies a la pel·lícula *The day after tomorrow*, però que fa més de trenta anys que debat la comunitat científica, especialment pel que fa a l'especulació sobre les possibilitats que l'escalfament actual en produeixi un.

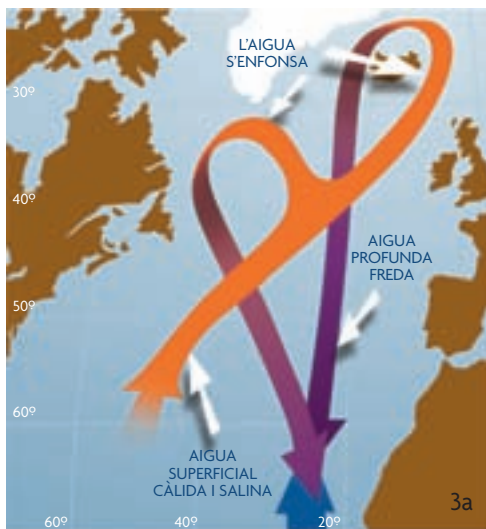
Al volum hi ha tres articles que analitzen la relació entre els oceans i el canvi global. El professor Carles Bas discuteix la relació entre la pesca i el canvi global analitzant la interrelació entre l'atmosfera i el mar i la seva repercussió en els recursos pesquers, Rafel Simó analitza també els intercanvis oceà-atmosfera, discutint els mecanismes de retroacció entre aquests dos sistemes i posant de relleu la importància de la biogeoquímica oceànica en el funcionament del clima, i Francesc Peters presenta l'anàlisi de la turbulència de petita escala i com els canvis globals poden afectar l'estructura, la dinàmica i la funció del sistema planctònic.

El tast del canvi global acaba amb dues aportacions que fan referència a sistemes terrestres: l'encapçalada per Josep Peñuelas i altres investigadors del CREA i del CSIC, on s'analitzen les alteracions produïdes pels canvis climàtic i atmosfèrics en l'estructura i el funcionament d'alguns ecosistemes terrestres, i el treball presentat per Emilia Gutiérrez i altres investigadors de la Universitat de Barcelona, el govern d'Aragó i la Universitat de Winnipeg al Canadà, on es fa un resum dels resultats obtinguts quan s'ha analitzat l'efecte del canvi global en diferents espècies de coníferes en diversos hàbitats i ambients de la península Ibèrica.

El títol és fidel al contingut: només un tast de canvi global. El lector del llibre es trobarà amb un contingut heterogeni i que no cobreix tots els aspectes que hom coneix com a canvi global, però amb articles autoconsistentes i interessants. La Societat Catalana de Biologia, amb la sensibilitat i dedicació que sempre mostra en les seves activitats, contribueix una vegada més amb aquest volum a la difusió de la ciència a casa nostra acollint uns temes que, com tots els bons tasts, indueixen a fer-ne un menjar complet.

MARTÍ BOADA I JUNCA

Universitat Autònoma de Barcelona



La circulació termohalina es dona a tot el globus. A l'Atlàntic nord, l'aigua freda i salina que arriba al voltant de Groenlàndia s'enfonsa i baixa vers el sud pel fons de l'oceà (3a). El corrent del Golf, quan arriba a Noruega a l'estiu produeix un *boom* de plàncton com el que es veu a la figura (3b).

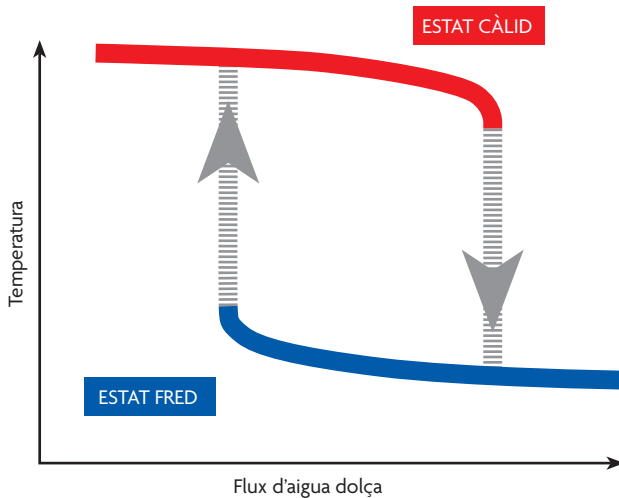
deu anys. Durant els mateixos períodes es van produir, de ben segur, variacions substancials del règim de vents, ja que els materials transportats pel vent, que es dipositen al gel i que ara es poden analitzar, varen ser entre tres a set vegades més abundants que quan l'episodi ja havia acabat. De fet, hi ha alguns investigadors que han trobat indicis que poden portar a concloure que la major part dels canvis del final del Younger Dryas es van donar en cinc anys i que van configurar un escenari ambiental d'intensos canvis i perturbacions climàtiques. L'estudi de la composició de les bombolles d'aire atrapades en el gel també aporta informació sobre l'extensió global de zones d'aiguamolls durant aquell període.

Durant els darrers 120.000 anys hi ha hagut també altres episodis climàtics ràpids. S'agrupen amb els noms d'episodis Dansgaard-Oeshger i d'episodis Heinrich. Els episodis Dansgaard-Oeshger comencen amb un escalfament ràpid de l'atmosfera, en unes tres dècades, de 5-10° C, seguit per un període durant el qual la temperatura es manté constant, per després tornar-se a refredar lentament durant uns quants segles. Aquests episodis s'han repetit en cicles de 1.500, 3.000 i 4.500 anys sense que, aparentment hi hagi hagut causes externes a la Terra que els hagin provocat. Els episodis de Heinrich són més característics i s'han donat sobretot en els darrers 60.000 anys i amb períodes de 10.000 anys i es caracteritzen pel rastre que han deixat en els sediments amb una concentració anòmala de restes, la qual cosa sembla suggerir temperatures i nivell del mar més altes, també en qüestió de poques dècades.

■ ELS CANVIS DEL CORRENT TERMOHALÍ: UN POSSIBLE MECANISME DELS CANVIS CLIMÀTICS RÀPIDS

Des d'un punt de vista pràctic, el punt clau i el principal interès de l'estudi dels canvis climàtics ràpids del passat de cara al futur immediat és poder esbrinar si els mecanismes que durant el passat els han desencadenat són anàlegs als que es poden donar en un futur proper com a conseqüència de l'impacte de les activitats humanes sobre el sistema climàtic.

Actualment, el règim de circulació d'aigua superficial i profunda en tots els oceans del planeta segueix un patró força estable. La circulació als oceans és induïda per una combinació de l'acció del vent, les mareas, i els corrents moguts per les diferències de temperatura i de concentració de sals, l'anomenada circulació termohalina, modulada per la rotació de la Terra. Del patró de la circulació termohalina a tot el globus, allò que passa a les dues conques oceàniques fonamentals, la de l'Atlàntic i la del Pacífic, influeix de forma determinant el clima als continents i a la resta del globus. El tret més significatiu del corrent termohalí és que els corrents oceànics superficials ajuden a redistribuir l'energia que arriba a la Terra procedent del Sol. En mitjana anual, a les zones properes a l'equador hi ha un excés d'energia, mentre que a les regions polars hi ha un dèficit energètic. Aquesta heterogeneïtat de la distribució energètica es compensa mitjançant uns fluxos d'aire, que produeixen els vents de l'oest i els vents alisis, i d'aigua, que essencialment tenen una component de l'equador cap al pols. Pel que



Els dos estats de circulació de l'aigua del mar a l'Atlàntic nord es poden simbolitzar amb aquest cicle d'histeresi. L'estat actual es representa en color vermell. Si el flux d'aigua dolça que es produeix com a conseqüència de la fusió dels gels i una major precipitació supera un cert llindar, hi ha una transició ràpida vers l'estat representat en blau, que portaria a moltes zones de l'Europa occidental i Nord-amèrica a un clima més fred.

fa a l'oceà Atlàntic Nord, s'estableix un corrent oceànic que, modulats per la rotació de la Terra, va de les zones equatorials properes al continent americà cap a les regions polars orientals de la conca, és a dir, les Illes Britàniques i la península d'Escandinàvia. Aquest corrent és la causa que els països nòrdics tinguin un clima més temperat que el que correspondria per la seva latitud. L'aigua procedent de les regions tropicals té una salinitat alta que, combinada amb el refredament que es produeix a causa de les temperatures que imperen a les regions polars, fa que assoleixi una densitat que la fa enfonsar-se. Així es crea un corrent que, a la conca Atlàntica, porta aigua superficial càlida i salina de l'equador vers el nord i que, en canvi, pel fons transporta aigua del nord vers el sud. Aquest mecanisme té una gran estabilitat i no es dona a tot el planeta ja que hi ha només quatre zones a tota la Terra on l'aigua superficial s'enfonsa: davant de la península del Labrador i de Groenlàndia, al cercle polar Àrtic, i als mars de Ross i de Weddell, a l'Antàrtida. En total cada segon s'enfonsen 36 milions de m³, dels quals 15 ho fan a l'hemisferi nord, que transporten els 1,3·10¹⁵ watts que fan que la temperatura en aquelles latituds sigui uns deu graus superior al que seria sense aquests corrents.

No se sap gaire cosa encara sobre la variabilitat actual d'aquests corrents. Una línia de treballs intenta

relacionar indicadors de canvis del clima regionals amb incidència planetària, com els associats al fenomen del Niño o l'anomenada oscil·lació de l'Atlàntic Nord amb la intensitat del corrent termohalí. Una altra línia d'investigació prova de relacionar els canvis en la intensitat o en el patró de la circulació al mar amb els canvis climàtics ràpids que s'han donat en altres períodes de la història geològica de la Terra. L'anàlisi paleoclimàtica dels gels i dels sediments fa pensar que hi ha hagut períodes en què la circulació als oceans ha tingut un patró diferent i que el canvi entre un patró de circulació i un altre ha estat ràpid.

Com s'ha dit, als mars del nord, actualment, l'aigua superficial procedent de les latituds equatorials és molt densa perquè té una salinitat gran i, a la vegada, assoleix temperatures baixes. Si l'augment de la temperatura de l'atmosfera fa que es fonguin bona part dels gels continentals d'Amèrica del Nord i de Groenlàndia, el flux d'aigua dolça a l'Atlàntic Nord que s'origina, sumat al previsible augment de la pluviositat, pot afectar la densitat de les aigües superficials procedents de latituds baixes disminuint-ne la salinitat i la tendència a enfonsar-se. Aquest flux d'aigua dolça al mar pot ser discontinu, ja que la dinàmica de la fusió dels gels fa que els gels del mar a la desembocadura dels rius formin una mena de tap que reté l'aigua continental fins que, en trencar-se de manera més o menys brusca, alliberen de cop una gran quantitat d'aigua dolça. Aquest flux pot ser la causa de la interrupció sobtada² del patró de circulació actual, i del consegüent canvi de la circulació global de l'aigua als oceans que podria portar, paradoxalment, els països situats a la conca de l'Atlàntic nord a un clima més fred. Això és justament el que planteja la pel·lícula *The day after tomorrow* que esmentàvem al començament.

En base a múltiples simulacions que abasten des de models simples fins arribar als complicats models de circulació general, ara es pot dir que el sistema oceà-atmosfera sotmès als mateixos forçaments externs pot assolir diferents règims d'equilibri estables, diferents patrons de circulació de l'aire i de l'aigua, un dels quals és l'actual i un altre, de ben diferent, és el que va tenir lloc durant episodis com el Younger Dryas, els de Heinrich o de Dansgaard-Oeschger que esmentàvem abans. La transició entre aquests estats estables es dona de forma molt ràpida quan determinats paràmetres climàtics assoleixen uns valors llindars. Aquest comportament, que necessàriament és no lineal, es descriu mitjançant l'analogia amb els cicles d'histeresi, cicles que

2. En qüestió d'una o dues desenes d'anys.

també es donen en altres disciplines de la física. El cicle mostra de forma molt clara l'existència de dos estats d'equilibri estables diferents, que podrien correspondre per un costat a l'estat del clima actual i, per l'altre, a un estat caracteritzat per més fred en moltes zones de Europa Occidental i Amèrica del Nord.

■ TOT AIXÒ, POT ÉSSER UN PROBLEMA?

L'escala de temps dels canvis climàtics sobtats és tan petita que la societat i els ecosistemes naturals poden tenir problemes d'adaptació. Per tant, des d'una perspectiva actual, una de les qüestions fonamentals, ara per ara sense resposta, és saber si les activitats humanes poden desencadenar un canvi climàtic sobtat i, en el cas de resposta afirmativa, saber a quina distància temporal estem del desencadenament del procés de canvi. La idea dominant fins ara sobre el canvi climàtic d'origen antròpic era que els canvis serien graduals i que, per tant, la possibilitat d'adaptar-se era alta, ja que la societat actual (les infraestructures, les persones, els habitatges, els usos del sòl, els processos industrials, etc.) és molt dinàmica i de fet canvia en escales de temps molt més petites que les escales que es considerava que caracteritzaven els canvis del clima. També els ecosistemes durant la història geològica de la Terra s'han adaptat majoritàriament a situacions de canvi ambiental gradual. Naturalment no tots; n'hi ha d'especialment vulnerables que no s'adapten i desapareixen, però la història de la biosfera, en escales de temps geològiques, contínuament ha experimentat aquests tipus de processos i la capacitat d'adaptació de la biosfera s'ha demostrat amb la seva supervivència. El problema sorgeix ara, però, si les condicions ambientals varien tan ràpidament que posen en perill majoritàriament aquesta capacitat d'adaptació. ☺

REFERÈNCIES

- ALLEY, R. B. *et al.* (2002): *Abrupt Climate Change. Inevitable Surprises*, Washington D.C., National Academy Press.
- ARRHENIUS, S. (1896): "On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground", *Phil. Mag.* 41 237-276.
- EEA (Report No 2/2004): "Impacts of Europe's changing climate. An indicator based assesment" (<http://www.eea.eu.int>).
- LLEBOT, J. E. (2003): "Canvis climàtics sobtats: la recerca més dinàmica sobre el clima", *Treballs de la Societat Catalana de Biologia*, 54: 13-28.
- MILANKOVITX, M. (1920): *Theorie Mathematique des Phenomenes Thermiques produits par la radiation solaire*, Paris, Gauthier-Villars.
- PEÑUELAS, J. i altres (2002): "Changed plant and animal life cycles from 1952 to 2000 in the Mediterranean region", *Global Change Biology*, 8: 531-544.
- WEART, S. R. (2003): *The discovery of global warming*, Cambridge (EUA), Harvard University Press.

Josep Enric Llebot. Departament de Física, Universitat Autònoma de Barcelona. Secció de Ciències de l'Institut d'Estudis Catalans.

