



PER QUÈ CANVIA, EL CLIMA?

ELS FENÒMENS QUE CONFIGUREN EL CLIMA DE LA TERRA I ELS FACTORS QUE EXPLIQUEN ELS CANVIS CLIMÀTICS

Josep Calbó

De la mateixa manera que un cotxe modifica la velocitat si passa d'anar per pla a emprendre una rampa de pujada o si hom prem l'accelerador, el clima de la Terra canvia si els equivalents climàtics al pendent o a la força de tracció del motor modifiquen el seu valor, sigui per la causa que sigui. Abans d'explicar quins són els factors que configuren el clima de la Terra, i si estan o no canviant, és bo que ens aturem a definir el concepte clau d'aquest article: el clima. Hom pot dir que el clima és l'estadística de l'oratge (el temps meteorològic) al llarg d'un període relativament llarg de temps cronològic i per a un determinat territori. Així, l'àrea per a la qual es defineix el clima pot ser tan petita com uns pocs quilòmetres quadrats (en aquest cas, sovint es parla de microclima). Però és més habitual parlar de clima d'un territori més extens, limitat o no políticament, on les característiques geogràfiques i meteorològiques siguin més o menys comunes (la Mediterrània occidental, el Sàhara...). També es pot generalitzar encara més el terme, i parlar del clima global, és a dir, per a tota la Terra.

Pel que fa a les variables que s'inclouen en una climatologia, sovint es limiten a la temperatura de l'aire i la precipitació. Però es poden fer estudis climàtics de moltes variables més: el vent, la radiació solar, la nuvolositat... o combinar-les per obtenir una descripció més completa. En relació amb la caracterització estadística, el més simple és limitar-la a la mitjana corresponent a una determinada base temporal (anual, per exemple) però una descripció completa del clima requereix també la de les variacions al llarg de l'any i dels extrems de les distribucions; és a dir, els fenòmens que es donen extraordinàriament però que poden tenir efectes rellevants (Martín Vide, 2002).

■ PER QUÈ TENIM EL CLIMA QUE TENIM?

D'entrada hem de dir que ens referirem al clima de tota la Terra i el caracteritzarem per una sola variable: la temperatura mitjana de l'aire a la superfície, que ac-

tualment és propera a 15°C. Per tant, la pregunta que volem explicar és per què la temperatura de l'aire a la superfície de la Terra és precisament aquesta.

La Terra bescanvia energia amb la resta de l'Univers, de manera que tendeix a assolir un equilibri entre l'energia que rep i la que emet. Com que l'intercanvi d'energia només es pot fer mitjançant radiació (atès que l'espai al voltant del planeta és buit), hom diu que la Terra es troba en balanç radiatiu. Així, la Terra rep energia provinent del Sol: la radiació solar, bàsicament llum visible però també radiació ultraviolada i en l'infraroig proper. Donada l'activitat actual del Sol, i la distància a la qual la Terra orbita al voltant de l'astre, la radiació mitjana al llarg de l'any que arriba sobre un

metre quadrat de superfície horitzontal perpendicular al feix solar és de 1367 W (valor que s'anomena *constant solar*, cosa que ja indica que varia molt poc, almenys en escales de temps relativament curtes). Com que el feix solar no arriba a tota la Terra perpendicularment, i com que en qualsevol moment la Terra només exposa la meitat de la seva superfície al Sol, el valor efectiu d'energia so-

lar que arriba a tota la Terra de mitjana resulta ser la quarta part, 342 W/m².

Si anés absorbint contínuament aquesta energia i no tingués algun mecanisme diguem-ne de refredament, la Terra s'aniria escalfant. Però la Terra no absorbeix tota l'energia solar que li arriba. Una determinada fracció, quantificada amb el que s'anomena albedo planetari, és reflectida de nou cap a l'espai. Aquesta energia reflectida no escalfa la Terra, i per tant, l'albedo terrestre és un factor molt important. D'altra banda, la llei de Planck ens diu que tot cos que es troba a una temperatura per sobre del zero absolut emet radiació. Així, la Terra emet radiació, i donades les temperatures habituals la radiació emesa correspon a l'infraroig tèrmic, que en el context climàtic s'anomena radiació terrestre, per distingir-la de la solar.

Doncs bé, si el clima de la Terra depengués només del balanç entre la radiació solar neta absorbida (és a

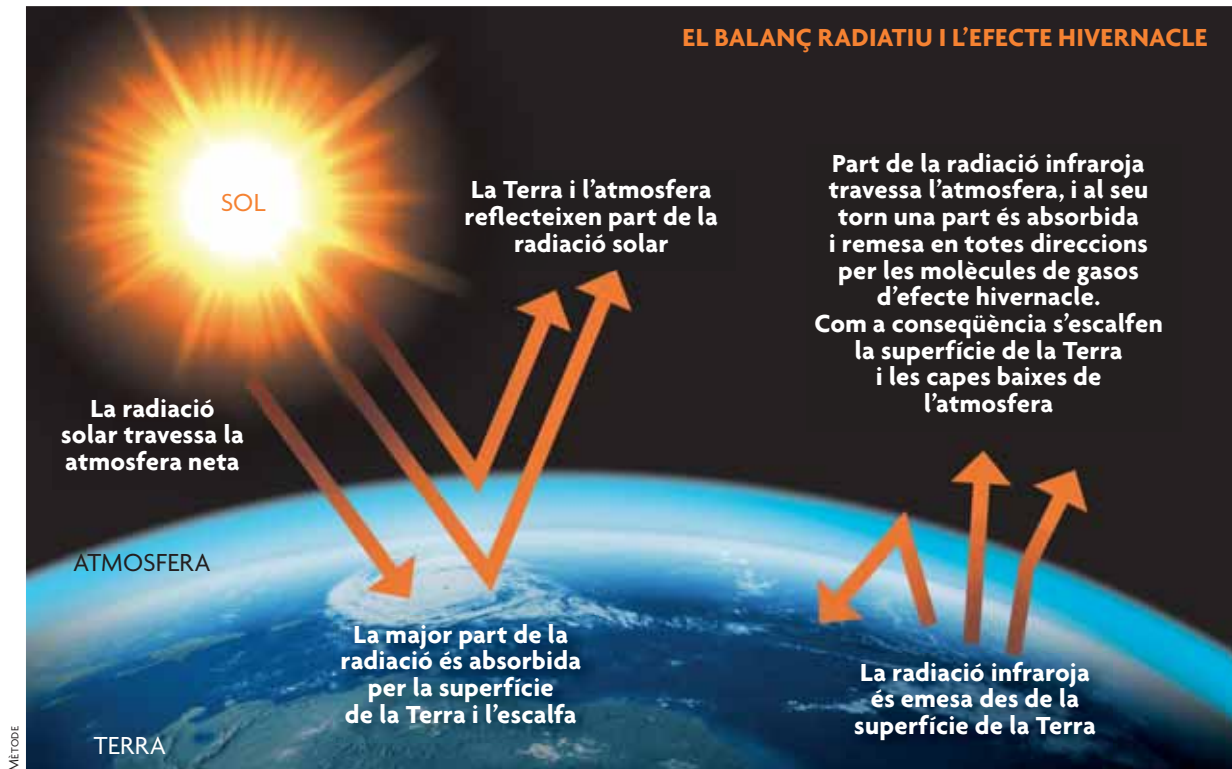


Figura 1. Esquema simplificat del balanç energètic en el planeta Terra, considerant l'efecte hivernacle causat per l'atmosfera.

dir, la diferència entre la que prové del Sol i la que és reflectida) i la radiació terrestre emesa, la temperatura estaria molt per sota de la que actualment observem. Per tant, per explicar el clima de la Terra ens cal un segon element: l'atmosfera. L'atmosfera és la capa formada bàsicament per una barreja de gasos, l'aire, que envolta la Terra. A més de gasos, l'atmosfera conté partícules, les quals si són d'aigua o de gel i es presenten en prou abundància en un determinat lloc i moment constitueixen els núvols, mentre que si són d'altres composicions s'anomenen en general aerosols. Els núvols afecten sensiblement el balanç radiatiu. Principalment perquè els núvols reflecteixen radiació solar cap a l'espai de manera molt eficient, com sap qualsevol persona que hagi volat en avió per damunt d'una capa de núvols: vistos des de sobre, els núvols són molt blancs. Amb els núvols, l'albedo del planeta passa a ser del 30%. Lògicament, si la quantitat de radiació solar reflectida és més gran, la que és absorbida és més petita, és a dir que, si tenim en compte aquest efecte dels núvols, la temperatura de la Terra seria encara més baixa, uns 18°C sota zero.

«LA TERRA NO ABSORBEIX TOTA L'ENERGIA SOLAR QUE LI ARRIBA. UNA DETERMINADA FRACCIÓ, QUANTIFICADA AMB EL QUE S'ANOMENA ALBEDO PLANETARI, ÉS REFLECTIDA DE NOU CAP A L'ESPAI»

Afortunadament, l'atmosfera té un altre paper en el balanç radiatiu. Es tracta del fet que alguns gasos que formen part de l'aire tenen la propietat d'absorbir radiació de determinades longituds d'ona. Aquests gasos no són pas els més abundants en l'atmosfera (el nitrogen i l'oxigen) sinó d'altres que es troben en concentracions molt més baixes: el vapor d'aigua, el diòxid de carboni (CO₂), el metà, l'òxid nítric, l'ozó i altres gasos encara més rars. Aquests gasos presenten bandes d'absorció en la regió de l'infraroig tèrmic, és a dir, que absorbeixen radiació terrestre. Per tant, l'atmosfera absorbeix radiació terrestre, i això impedeix que part d'aquesta energia escapi cap a l'espai; és a dir, reduint el refredament.

Aquest fenomen es coneix com *efecte d'hivernacle* i depèn, lògicament, de la quantitat de gasos amb aquesta propietat que hi ha a l'atmosfera, i també de les seves característiques concretes (hi ha gasos que, per unitat de massa, presenten un efecte d'hivernacle molt més gran que altres). A més, els núvols no només reflecteixen radiació solar cap a l'espai, sinó que també són eficients absorbidors de radiació terrestre i per tant

contribueixen a l'efecte d'hivernacle. També els aerosols hi representen un paper: n'hi ha que tenen un efecte dominant de reflexió de la radiació (solar) mentre que d'altres són eficients absorbidors de tot l'espectre de radiació (solar i terrestre).


Ara sí, si determinem la temperatura que ha de tenir la superfície de la Terra per tal que, amb una emissivitat reduïda per l'efecte d'hivernacle, compensi la radiació solar absorbida, aquesta resulta ser d'uns 15°C. Els fluxos d'energia, en forma de radiació, que configuren el balanç energètic que dona lloc a aquesta temperatura es representen, esquemàticament, en la figura 1.

■ ELS CANVIS DEL CLIMA

Si analitzem l'evolució del clima de la Terra al llarg de tota la seva existència, trobarem que a escales de milers de milions d'anys, el clima ha variat molt substancialment. Aquests canvis estan relacionats directament amb els canvis en l'energia emesa pel Sol (com

totes les estrelles, el Sol evoluciona, i ha estat –i encara està– augmentant la seva lluminositat), i els canvis en la composició de l'atmosfera terrestre (per exemple, des de l'aparició de la vida sobre la Terra s'han extret de l'atmosfera grans quantitats de CO₂ gràcies a la fotosíntesi, que al seu torn ha alliberat l'oxigen que actualment és el segon gas més abundant) (Uriarte, 2003). Però situem-nos en escales temporals molt més curtes i properes, per exemple el darrer milió d'anys, és a dir, en períodes en què el Sol bàsicament no ha canviat la seva lluminositat, en què els continents i oceans presenten una distribució igual a l'actual, i en què la composició atmosfèrica pot considerar-se invariable pel que fa als gasos més abundants.

Els canvis en el clima més destacats en aquest període «recent» són els cicles de glaciació-interglacial. Es tracta de períodes més freds que el present (amb temperatures 6-10°C per sota de l'actual), d'uns 100.000 anys de durada, en què els casquets polars s'estenen fins a latituds mitjanes i el nivell del mar es troba



«QUALSEVOL MODIFICACIÓ
DE LA RADIACIÓ SOLAR INCIDENT
SOBRE LA TERRA O DE L'EFECTE
D'HIVERNACLE NATURAL
DE L'ATMOSFERA MODIFICA
EL BALANÇ ENERGÈTIC I PROVOCA
CANVIS EN EL CLIMA»

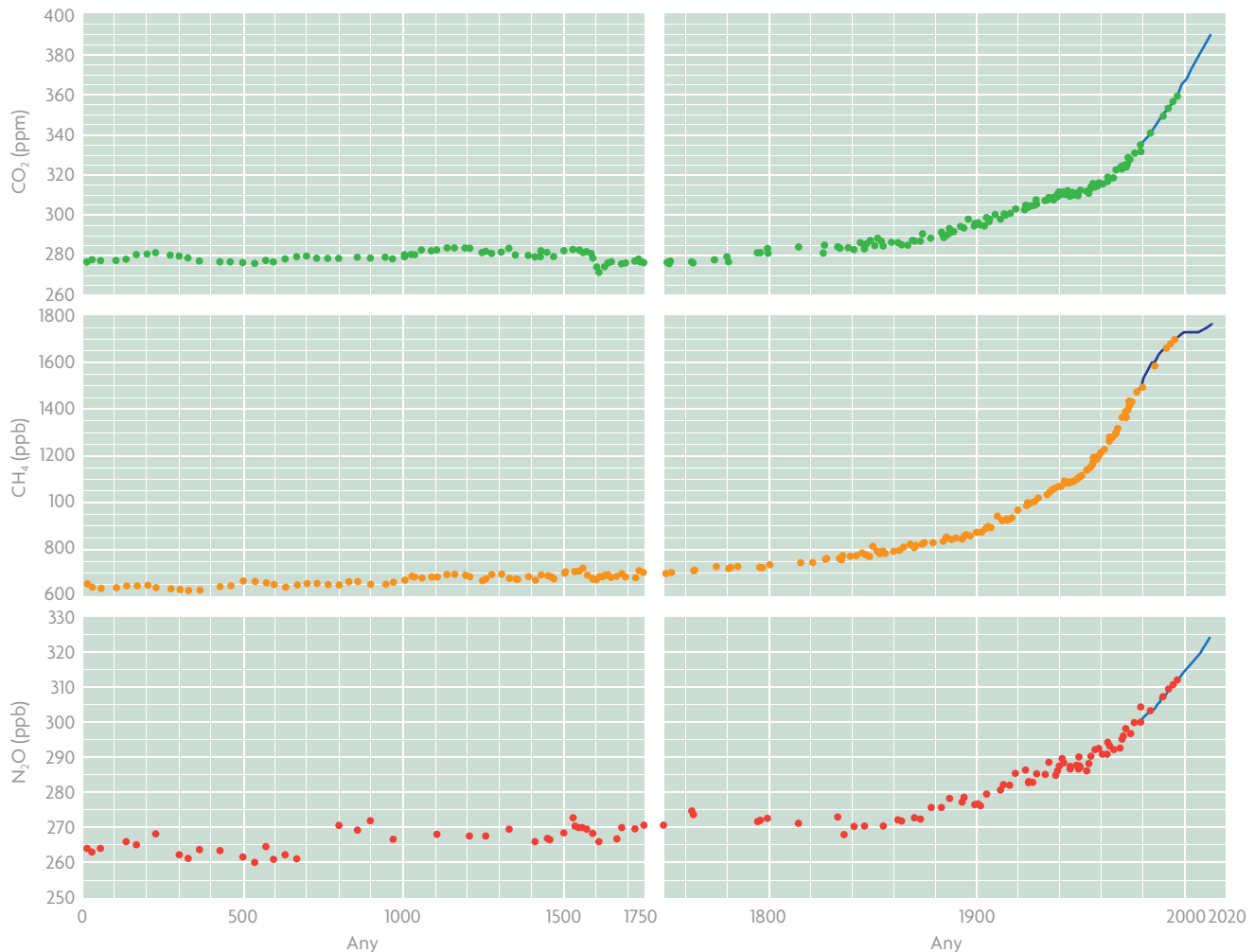


Figura 2. Concentracions de CO_2 , metà (CH_4) i òxid nitrós (N_2O) (de dalt a baix) a l'atmosfera durant l'era industrial (dreta) i des de l'any 0 fins el 1750 (esquerra). Els punts provenen de determinacions indirectes (aire retingut en el gel) mentre que les línies contínues indiquen mesures directes de les concentracions a l'observatori de Cape Grim, a Tasmània. Es mostra clarament el creixement, exponencial, de les concentracions de tots tres gasos des de la Revolució Industrial. Reproducció de la figura 6.11 del cinquè informe de l'IPCC (Ciais et al., 2013).

molt per sota de l'actual; seguits de períodes d'uns 20.000 anys de durada amb un clima similar al present. Aquests cicles es relacionen causalment amb els cicles dels paràmetres orbitals de l'òrbita terrestre al voltant del Sol (Milankovitch, 1920). En efecte, l'òrbita modifica l'excentricitat (és a dir, és més o menys circular o el·líptica), l'obliquïtat (la inclinació de l'eix de rotació de la Terra respecte del pla de l'eclíptica) i la precessió dels equinoccis (en quina data la Terra es troba més propera al Sol) en diversos cicles superposats de desenes de milers d'anys. La combinació d'aquests cicles no modifica de manera molt important la quantitat de radiació solar que arriba a la Terra però sí que fa variar notablement el repartiment de la radiació entre els hemisferis i al llarg de l'any. Atesa la presència de més terres emergides en l'hemisferi nord, sembla que una disminució de la radiació incident els mesos d'estiu en aquest hemisferi és l'origen del refredament global que

acaba provocant una glaciació. Però per explicar-ho cal recórrer a diverses retroaccions positives, és a dir, que reforcen la causa original.

La primera de les retroaccions és la del gel i l'albedo. Si a l'estiu arriba menys radiació, es fon una fracció menor de la neu caiguda a l'hivern. La presència de més neu augmenta l'albedo planetari, cosa que vol dir que s'absorbeix menys radiació solar, fet que incrementa el refredament. Dues retroaccions més tenen a veure amb gasos amb efecte d'hivernacle. Per una banda, un inici de refredament disminueix el contingut de vapor d'aigua a l'atmosfera (ja que es redueix l'evaporació i també el nivell saturant del vapor d'aigua a l'aire). Per altra banda, el CO_2 és absorbit més eficientment pels oceans, tant pel canvi de la solubilitat com per l'augment d'activitat fotosintètica de cert fitoplàncton. Òbviament, menys vapor d'aigua i CO_2 significa menor efecte d'hivernacle i per tant, més refredament.

Tampoc s'ha d'oblidar el paper de la circulació oceànica global, que és molt sensible a la temperatura de l'Atlàntic Nord. En realitat, els canvis en la circulació oceànica són fonamentals per explicar la globalització d'un refredament que inicialment és hemisfèric. La seqüència de causes i retroaccions s'inverteix al final del període glacial, i dóna peu als períodes interglacials, com el que gaudim actualment.

De totes maneres, fins i tot dins dels períodes interglacials, el clima no es manté constant. Per exemple, cap al final de la darrera glaciació (quan la temperatura mitjana havia augmentat fins a nivells similars a l'actual) la Terra es va tornar a refredar de manera força sobtada, en el període conegut com a *younger Dryas* (Dryas recent). Encara que l'explicació d'aquest refredament no és clara, sembla que la circulació oceànica, debilitada per l'aportació d'aigua dolça i freda provinent de la fusió del gel, a l'Atlàntic Nord, hi va representar un paper molt important. Ja en el darrer mil·lenni, hom parla de l'«òptim climàtic medieval» i de la «petita edat de gel», terminologia que és bastant autoexplicativa. En aquesta darrera època, que correspon al període entre els segles XIV i XIX, amb un mínim de temperatura cap a finals del segle XVIII, el refredament (temperatures 1-2°C inferiors a les actuals) va ser global, encara que es troba documentat sobretot a Europa. De nou, les causes tenen a veure amb la radiació solar (i particularment amb l'anomenat mínim de Maunder, uns decennis en què no es van detectar taques solars, fet que indica una disminució de l'activitat del Sol) i amb la composició atmosfèrica (es considera que va ser un període de gran activitat volcànica durant el qual hi havia més aerosols a l'atmosfera, que reflectien més radiació solar cap a l'espai).

■ EL CANVI CLIMÀTIC ANTROPOGÈNIC CONTEMPORANI

En els darrers decennis, el clima de la Terra també ha estat canviant. Aquest canvi contemporani, que a més és molt ràpid, és el que ha provocat la constitució del

Grup Intergovernamental d'Experts en Canvi Climàtic (IPCC, de les sigles en anglès), el qual periòdicament emet els informes que integren tot el coneixement que es va generant sobre el tema (Pachauri et al., 2014).

Concretament, les observacions de la temperatura, disponibles de manera global, indiquen que en el període 1880-2012 la temperatura mitjana ha pujat 0,85°C, augment que en bona part s'ha concentrat en els darrers quaranta anys. Cadascun dels darrers tres decennis ha estat més càlid que l'anterior, i es considera que

tots ells han estat els més càlids del darrer mil·lenni. En aquest cas, la causa no ha estat un canvi en la radiació solar incident, sinó en la composició atmosfèrica: l'augment de la concentració dels gasos amb efecte d'hivernacle, i en particular del CO₂. En efecte, el CO₂ a l'atmosfera ha anat augmentant de manera contínua des de la Revolució Industrial, com a resultat de l'ús de combustibles fòssils (carbó, petroli, gas natural) i com demostren les mesures directes (figura 2). Així, les dades ens diuen que recentment la concentració d'aquest gas ha assolit les 400 ppm (parts per milió), valor que supera de molt les 280 ppm de l'any 1800, i que de fet és un nivell que no s'havia assolit mai en el darrer milió d'anys.

En realitat, el CO₂ no és l'únic gas amb efecte d'hivernacle emès per l'activitat de l'espècie humana. N'hi ha d'altres que, encara que en menor magnitud, també se sumen al forçament radiatiu positiu (és a dir, a desequilibrar els fluxos energètics en el sentit que el sistema climàtic absorbeix més energia de la que allibera): el metà, els halocarburs, l'òxid nítrós (figura 2). A més, en iniciar-se un augment de tempe-

ratura, es posen en marxa diversos mecanismes de retroacció positiva: augmenta la quantitat de vapor d'aigua a l'atmosfera, i disminueix la coberta de gel i per tant l'albedo terrestre, entre d'altres. La mateixa activitat humana, però, provoca altres emissions, en aquest cas en forma de partícules (aerosols), les quals majoritàriament tendeixen a causar un forçament negatiu, és a dir, que reflecteixen més llum solar que la radiació terrestre que absorbeixen. També és cert que



MÈTODE

«LA QÜESTIÓ OBERTA ARA ÉS, DONCS, QUIN ÉS EL CANVI CLIMÀTIC FUTUR AL QUAL LA HUMANITAT SERÀ CAPAÇ D'ADAPTAR LES SEVES ESTRUCTURES SOCIOECONÒMIQUES»

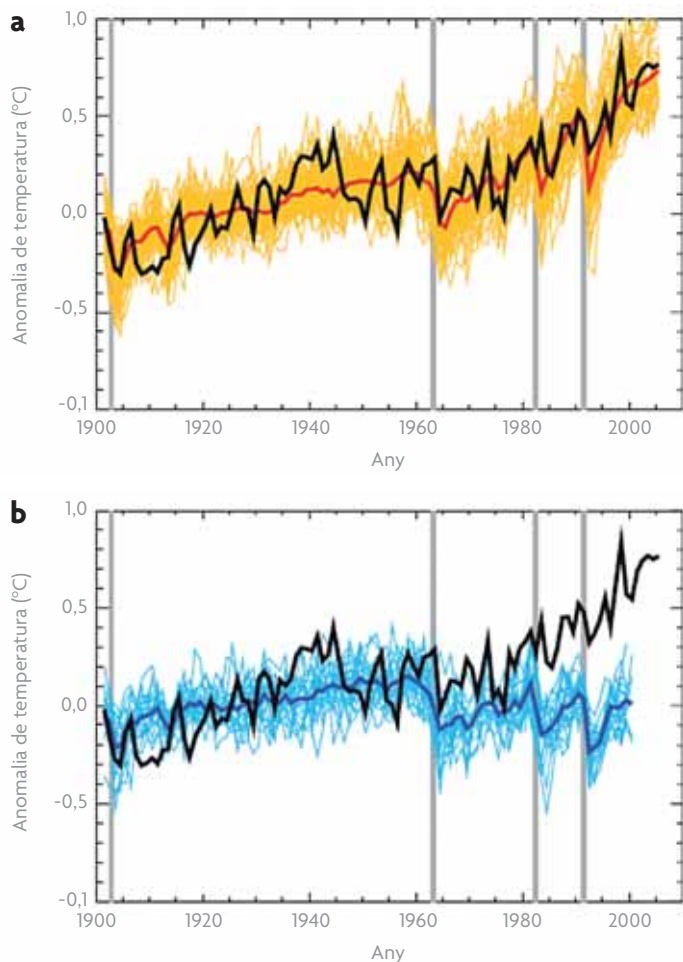


Figura 3. Comparació entre les anomalies de la temperatura global mitjana observades (línies negres) i les simulacions amb models climàtics forçades amb (a) els factors naturals i antropogènics (58 simulacions de 14 models diferents, línies grogues, i la mitjana de tots ells, línia vermella) i (b) només els factors naturals (19 simulacions de 5 models diferents, línies blau clar, i la mitjana de totes elles, línia blava gruixuda). Queda clar que per tal que els models reproduïxin l'evolució del clima, cal incloure-hi els factors antropogènics. Reproducció de la figura 9.5 del quart informe de l'IPCC (Hegerl et al., 2007).

«EL CO₂ NO ÉS L'ÚNIC GAS AMB EFECTE D'HIVERNACLE EMÈS PER L'ACTIVITAT DE L'ESPÈCIE HUMANA. N'HI HA D'ALTRES QUE, ENCARA QUE EN MENOR MAGNITUD, TAMBÉ SE SUMEN AL FORÇAMENT RADIATIU POSITIU»

hi ha altres mecanismes de retroacció, especialment vinculats als canvis en la quantitat i tipus de núvols, que podrien estar moderant l'escalfament. Sigui com sigui, no hi ha dubtes sobre la causa antròpica del canvi climàtic actual, ja que l'única manera que tenen els models climàtics de reproduir encertadament el clima dels darrers anys és inclouent-hi les emissions de gasos amb efecte d'hivernacle i d'aerosols; si només es consideren les causes naturals (evolució solar i erupcions volcàniques), els models no són capaços de simular l'escalfament recent (figura 3).

En resum, qualsevol modificació de la radiació solar incident sobre la Terra, o qualsevol modificació de l'efecte hivernacle natural de l'atmosfera, modifica el balanç energètic del sistema climàtic i per tant provoca canvis en el clima, tant de manera directa com mitjançant la contribució de diversos mecanismes de retroacció. Així, l'emissió de CO₂, altres gasos amb efecte d'hivernacle, aerosols i també els canvis d'ús del sòl (que modifiquen l'albedo), provocats per l'activitat humana, han estat influint sobre el clima en els darrers decennis, i ho continuaran fent en el futur, segons indiquen totes les projeccions climàtiques. La qüestió oberta ara és, doncs, quin és el canvi climàtic futur al qual la humanitat serà capaç d'adaptar les seves estructures socioeconòmiques, i quines han de ser les mesures de mitigació de les emissions que s'hauran de posar en pràctica per tal de no superar un escalfament intolerable. ☺

REFERÈNCIES

- Ciais, P., Sabine, C., Bala, G., Bopp, L., Brovkin, V., Canadell, J., ... Thornton, P. (2013). Carbon and other biogeochemical cycles. En T. F. Stocker, D. Qin, G. K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, ... P. M. Midgley (Eds.). *Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change* (465–570). Cambridge i Nova York: Cambridge University Press.
- Hegerl, G. C., Zwiers, F. W., Braconnot, P., Gillett, N. P., Luo, Y., Marengo Orsini, J. A., ... Stott, P. A. (2007). Understanding and attributing climate change. En S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, ... H. L. Miller (Eds.). *Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change* (pp. 663–745). Cambridge i Nova York: Cambridge University Press.
- Martin Vide, J. (2002). *El temps i el clima*. Barcelona: Rubes - Departament de Medi Ambient, Generalitat de Catalunya.
- Milankovitch, M. (1920). *Théorie mathématique des phénomènes thermiques produits par la radiation solaire*. Paris: Gauthier-Villars.
- Pachauri, R. K., Meyer, L. A. and the IPCC Core Writing (2014). *Climate change 2014: Synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Ginebra: IPCC.
- Uriarte, A. (2003). *Historia del clima de la Tierra*. Vitòria-Gasteiz: Servicio central de publicaciones del Gobierno Vasco.

Josep Calbó. Professor titular del Departament de Física. Universitat de Girona.