

MAR DE NÚVOLS

Oceans, aerosols, núvols i canvi climàtic

Rafel Simó

Institut de Ciències del Mar (CSIC), Barcelona

A SEA OF CLOUDS. Earth climate is closely linked to the chemistry of the atmosphere through the influence of the latter on the radiative balance. Greenhouse gases and aerosols cause heat retention at the earth surface and the lower atmosphere, and aerosols and clouds affect the atmospheric albedo (i.e., the amount of solar radiation that is reflected back to space and never reaches the surface). Aerosols, hence, play a multiple role in regulating climate, either by their optical properties or by seeding cloud formation. There are many sources of aerosols, but over the remote ocean, far from continents, most come from the oxidation of sulphur, carbon, nitrogen, and iodine gases emitted by the oceans' microbiota. Since the industrial revolution, aerosols have been playing a significant role in slowing down global warming. Over the current century, the oceans are predicted to reduce their cooling capabilities by sequestering less CO₂ and increasing too little their emission of aerosols and cloud precursors. Together with the expected reduction of anthropogenic aerosol loads due to the development of cleaner combustion technologies, these effects are predicted to accelerate temperature rise unless greenhouse gas emissions are dramatically reduced.

Un químic parla del clima?

El clima és el conjunt de fenòmens meteorològics que caracteritzen les condicions habituals o més probables d'un punt determinat de la superfície terrestre. Per extensió, quan parlem del clima de la Terra ens referim a les condicions ambientals mitjanes del conjunt del planeta. L'estudi del clima i dels seus canvis correspon clàssicament a geògrafs i a físics de l'atmosfera especialitzats com a climatòlegs. La meua formació de llicenciatura i doctorat, abans que em dedicés de ple a les ciències del mar, fou en química analítica i ambiental. No res de vents i pluges, huracans, gebrades i sequeres. I avui, tanmateix, sense deixar de fer química, i afegint-hi la biologia, em dedico a investigar l'impacte de la biosfera en la regulació del clima. És que hi ha una química i una biologia del clima?

Bombolles al gel

Aquesta pregunta es pot contestar de diverses maneres. N'hi ha una que passa per un viatge exòtic al sud de tot, als gels antàrtics. Les glaceres del continent gelat s'han anat formant per compactació de la neu caiguda i arriben als diversos quilòmetres de gruix. Com que l'Antàrtida té un clima molt sec (encara que no ho sembli), aquest gruix tan fenomenal correspon a centenars de milers d'anys d'innivació. En caure i compactar-se, la



Testimonis de gel de l'Antàrtida

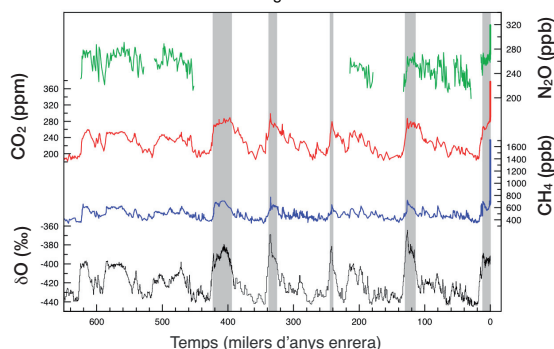


Figura 1. Concentracions dels gasos hivernacle òxid nítrós (N₂O), diòxid de carboni (CO₂) i metà (CH₄) a les bombolles d'aire atrapades al gel antàrtic durant els passats 650.000 anys, i analitzades gràcies a l'extracció de testimonis profunds de gel. El gràfic inclou també la proporció de deuteri en el gel, que és un bon indicador de la temperatura atmosfèrica a què es va formar la neu que va precipitar i va compactar-se fins a formar el gel. Els ombrejats mostren la durada dels períodes interglacials dels últims 400.000 anys. ppb és parts per mil milions; ppm és parts per milió. Dades del projecte EPICA (vegeu la bibliografia).



neu (esdevinguda gel) atrapa bombolles d'aire. Si som capaços d'extreure gel antic i analitzar l'aire que guarda, tenim una finestra oberta a la composició de l'atmosfera del passat. Això és el que han fet diversos projectes internacionals des de fa 15 anys: foradar el gruix de gel, treure'n testimonis, i analitzar la composició química de les bombolles d'aire. Un dels projectes actuals, EPICA, ha mostrat que, durant els últims 650.000 anys, la presència de certs gasos a l'atmosfera seguia amb molta exactitud les variacions de temperatura que experimentava la Terra en travessar glaciacions i períodes interglacials (fig. 1). Les dades del gel posen de manifest, d'una manera sorprenentment clara, que hi ha una estreta relació entre les variacions climàtiques i la composició de l'atmosfera.

La respiració del planeta

Molt abans que hom comencés a perforar els gels antàrtics, en l'Any Internacional de la Geofísica de 1958, el químic Charles David Keeling de la Scripps Institution of Oceanography (USA) va obtenir finançament per començar a mesurar CO_2 a l'atmosfera des del volcà de Mauna Loa (Hawaii), a 3.397 metres d'altitud. Un parell d'anys més tard, les mesures mostraven clarament que hi ha una estacionalitat en la concentració d'aquest gas: els valors són més elevats a l'hivern, quan la respiració dels descomponedors domina sobre la fotosíntesi a l'hemisferi nord; els valors són mínims a la primavera i principis d'estiu, quan domina la fotosíntesi (Keeling, 1960). Al cap de pocs anys es feia evident un altre fenomen, menys previsible que aquest: malgrat els puges i baixes estacionals, la concentració mitjana de CO_2 augmentava amb els anys de manera consistent i molt proporcional a l'increment demogràfic del planeta. Avui, amb 50 anys de dades, la *corba de Keeling* és

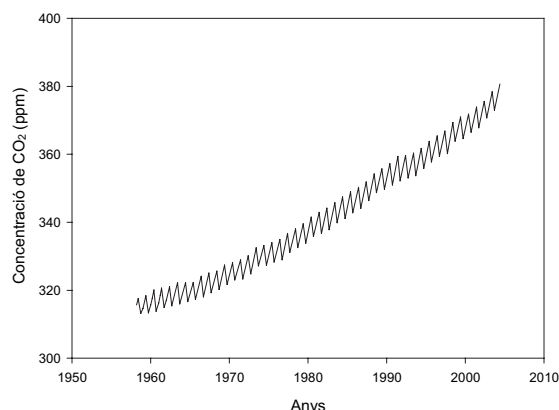


Figura 2. La *corba de Keeling*, que mostra la concentració de CO_2 a l'atmosfera, al volcà Mauna Loa de Hawaii. S'hi aprecien els cicles anuals de fotosíntesi i respiració, i l'increment constant al llarg de les últimes cinc dècades.



Figura 3. Svante Arrhenius (1859-1927), el primer científic que va descriure l'efecte hivernacle.

una de les proves més clares que la composició de l'atmosfera està canviant de forma ràpida i sense reculades (fig. 2), i que la concentració de CO_2 que estem assolint és molt superior a les dels últims centenars de milers d'anys.

Ara fa cent anys

Que els químics parlin d'aspectes rellevants per al clima i el canvi climàtic no és nou, ni tan sols ho va començar Keeling amb la seva famosa corba de CO_2 . Ara fa una mica més de cent anys, el 1896, el químic suec Svante Arrhenius (fig. 3) ja es preguntava si la temperatura mitjana superficial de la Terra depenia de la presència a l'atmosfera de gasos que absorbeixen calor, i si aquests gasos eren una de les causes dels cicles climàtics glacials del planeta. Tot fent càlculs a partir de principis bàsics, Arrhenius va descriure el que avui anomenem l'*efecte hivernacle*, que fa la Terra habitable, i va predir que doblar la concentració de CO_2 comportaria un escalfament global de 3 a 4°C (Arrhenius, 1896). A l'albada del s. XX, Arrhenius pensava que la crema de combustibles fòssils trigaria 500 anys a duplicar el CO_2 i que, en tot cas, faria el planeta més confortable i productiu. Avui sabem que el CO_2 ja ha augmentat un 30% des dels temps del químic suec, que els altres gasos d'efecte hivernacle CH_4 i el N_2O han augmentat un 100% i un 20%, respectivament (fig. 4), i que podríem arribar a les previsions d'Arrhenius durant el segle XXI. Allò que fa més reconegut el químic suec no són, tanmateix, aquestes prediccions; la major part de la seva carrera investigadora va anar cap a altres bandes, particularment cap al fenomen de l'electròlisi. El 1903, va rebre el Premi



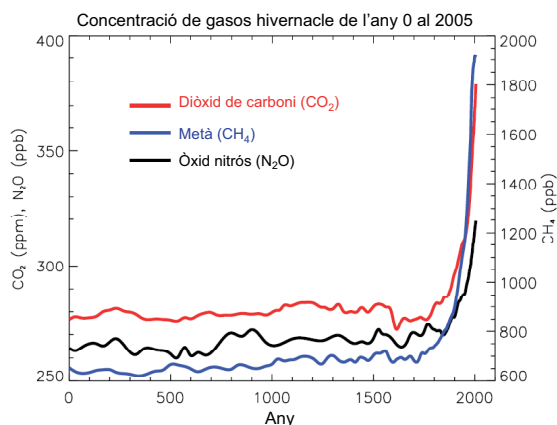


Figura 4. Concentracions de gasos hivernacle a l'atmosfera en els últims 2000 anys. Les dades s'han obtingut combinant mesures in situ amb mesures a les bombolles atrapades al gel antàrtic. ppb és parts per mil milions; ppm és parts per milió. Tret de Forster et al., IPCC 2007.

Nobel de Química per la seva Teoria de la Dissociació Electroliàtica.

Els motors del clima i les causes del canvi climàtic

Motors externs i motors interns

Avui sabem que les variacions del clima de la Terra han obèit principalment a causes externes, fenòmens còsmics com les oscil·lacions de l'òrbita i la inclinació de l'eix terrestre, l'activitat del Sol, o l'impacte de meteorits de gran magnitud. Les intuïcions d'Arrhenius i les observacions de Keeling i dels forada-gels antàrtics ens han mostrat, tanmateix, que hi ha causes internes que contribueixen a modular el clima a partir de les empentes produïdes per les causes externes (taula 1). La Terra és un sistema extraordinàriament complex, format per materials canviants i amb textures i propietats de dissipació de l'energia ben diferents. A més, el nostre és un planeta colonitzat per la vida, que afecta dràsticament la composició i el comportament de tots els compartiments de la superfície:

Taula 1. Els motors externs i interns del clima.

Motors externs	Motors interns
Activitat solar	Composició de l'atmosfera, efecte hivernacle
Moviment relatiu Terra-Sol (excentricitat, precessió, obliqüïtat)	Distribució desigual del balanç d'energia: fluxos d'energia incident, absorció i albedo de la superfície
Impactes de meteorits o cometes	Dinàmica interna del sistema: vents, corrents marins, retroalimentacions entre la biosfera i l'atmosfera
	Aerosols
	Núvols
	Coberta de gel i neu

l'atmosfera, els sòls, els oceans, els gels. Una de les característiques dels sistemes vius, i per extensió dels sistemes més complexos, és l'organització dels fenòmens en processos de retroacció, en què un canvi origina una sèrie de respostes en cadena o en xarxa que tendeixen a accelerar (ocasionalment) o a frenar (generalment) el mateix canvi. Així per exemple, si bé la freqüència i la durada dels cicles de glaciació i deglaciació indiquen que la causa que les engega és orbital, l'acoblament dels gasos a aquest cicle, que mostrava la figura 1, sembla indicar que els mecanismes interns del sistema, començant per la biosfera, contribueixen que aquests cicles es consolidin i probablement els donen l'amplitud que tenen.

El balanç d'energia

Sigui com sigui, i deixant de banda fenòmens còsmics catastròfics com els impactes de meteorits, el clima de la Terra depèn essencialment del *balanç d'energia* (fig. 5). Això és: de l'energia que rep del Sol, quanta retorna a l'espai i quanta és retinguda. Sabem que l'energia que s'absorbeix es degrada fins a dissipar-se en forma de calor. Si una part creixent de l'energia absorbida i dissipada en forma de calor no retorna a l'espai, la Terra s'escalfa. Si, en canvi, una part creixent de l'energia solar ja no és absorbida, sinó que és reflectida directament cap a l'espai, la Terra es refreda. I això, de què depèn? En bona part depèn de les textures i composició dels diversos components de què parlàvem més amunt. Del 100% de radiació solar de longituds d'ona curtes (altament energètiques) que arriba a la Terra, l'atmosfera en retorna a l'espai un 26% i n'absorbeix un 19%. La majoria de la que travessa l'atmosfera és absorbida pels oceans, els sòls i la biosfera, i tard o d'hora és dissipada en forma de calor (energia de longituds d'ona llargues). La gran majoria d'aquesta calor s'acaba irradiant cap a l'espai, la qual cosa fa que el planeta es trobi pràcticament en equilibri.



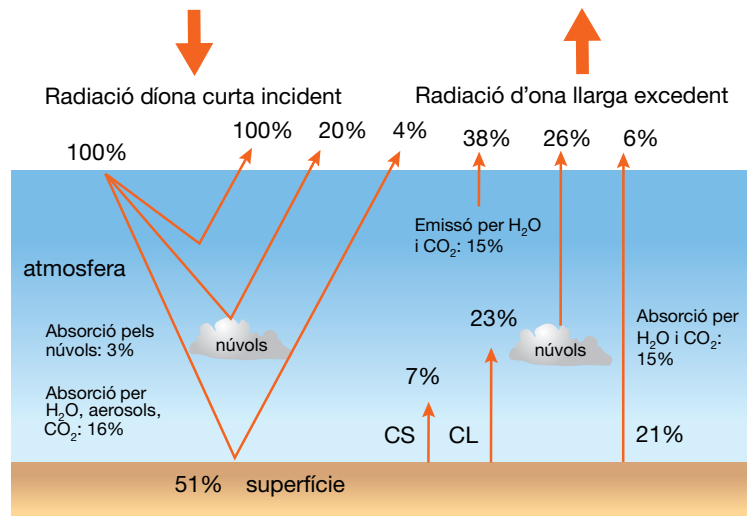


Figura 5. El balanç d'energia de la Terra. El gràfic descriu la destinació de 100 unitats d'energia provinents del Sol en forma de radiació d'ona curta. CS: calor sensible; CL: calor latent.

Forçant la màquina

Per què, doncs, la Terra s'escalfa tant de pressa d'ençà de la Revolució Industrial? Doncs perquè els humans estem canviant amb una rapidesa impensada algunes de les propietats del planeta (Duarte et al., 2006) que afecten aquest balanç d'energia (fig. 6). Una petita part del que és absorbit a l'atmosfera pels gasos d'efecte hivernacle no retorna a l'espai, i aquesta petita part és cada cop més gran a mesura que enriqueim

l'atmosfera amb aquests gasos. És el que hom anomena *forçament radiatiu positiu*, és a dir que els humans forcem la retenció de calor. No tot el que fa l'activitat humana té un *forçament positiu*, però. Els canvis dels usos del sòl i l'emissió de sofre, sutge i pols a l'atmosfera té un efecte de refredament, un *forçament negatiu*. D'aquest en parlaré més endavant. En conjunt, però, el resultat net de la nostra activitat en el planeta és l'escalfament progressiu, el que anomenem *escalfament global*.

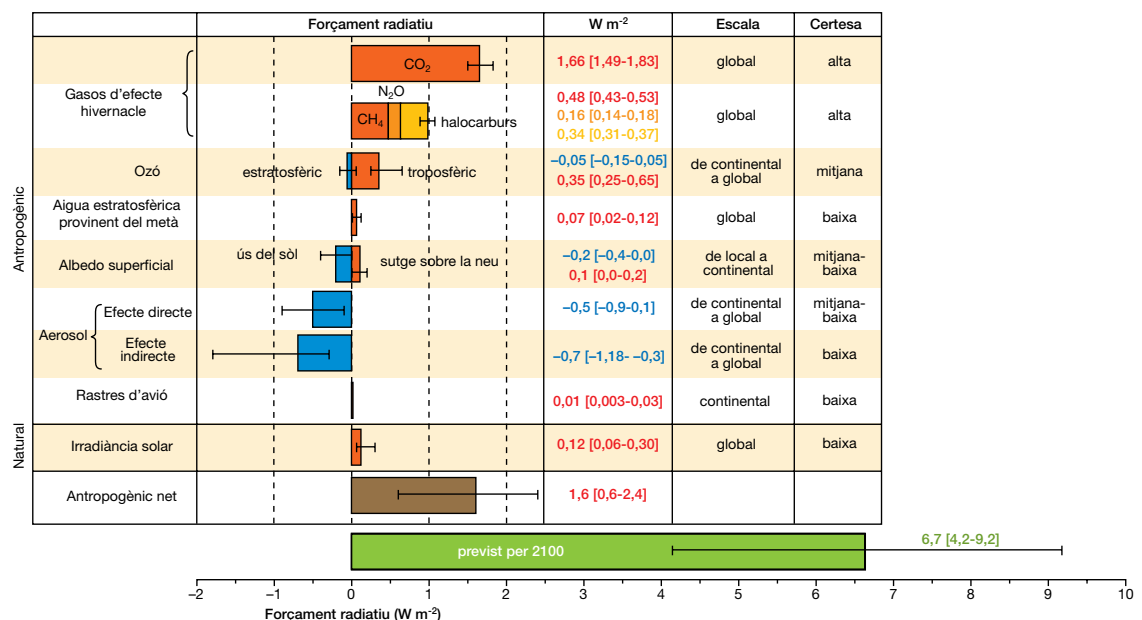


Figura 6. Forçaments radiatius observats (o estimats) des de la Revolució Industrial fins avui, amb les seves causes i la certesa amb què es coneixen. El forçament s'expressa en unitats de flux d'energia (W m⁻²). Els forçaments positius (groc a vermell) impliquen escalfament respecte a l'època preindustrial. Els forçaments negatius (blau) impliquen refredament. El gràfic inclou també el forçament natural net (causat per un lleuger increment de l'activitat solar) i el forçament antropogènic net (marró), que és d'escalfament. A la part de baix s'inclou el forçament previst per al 2100, que és d'un escalfament considerable. Adaptat de Forster et al., IPCC 2007.



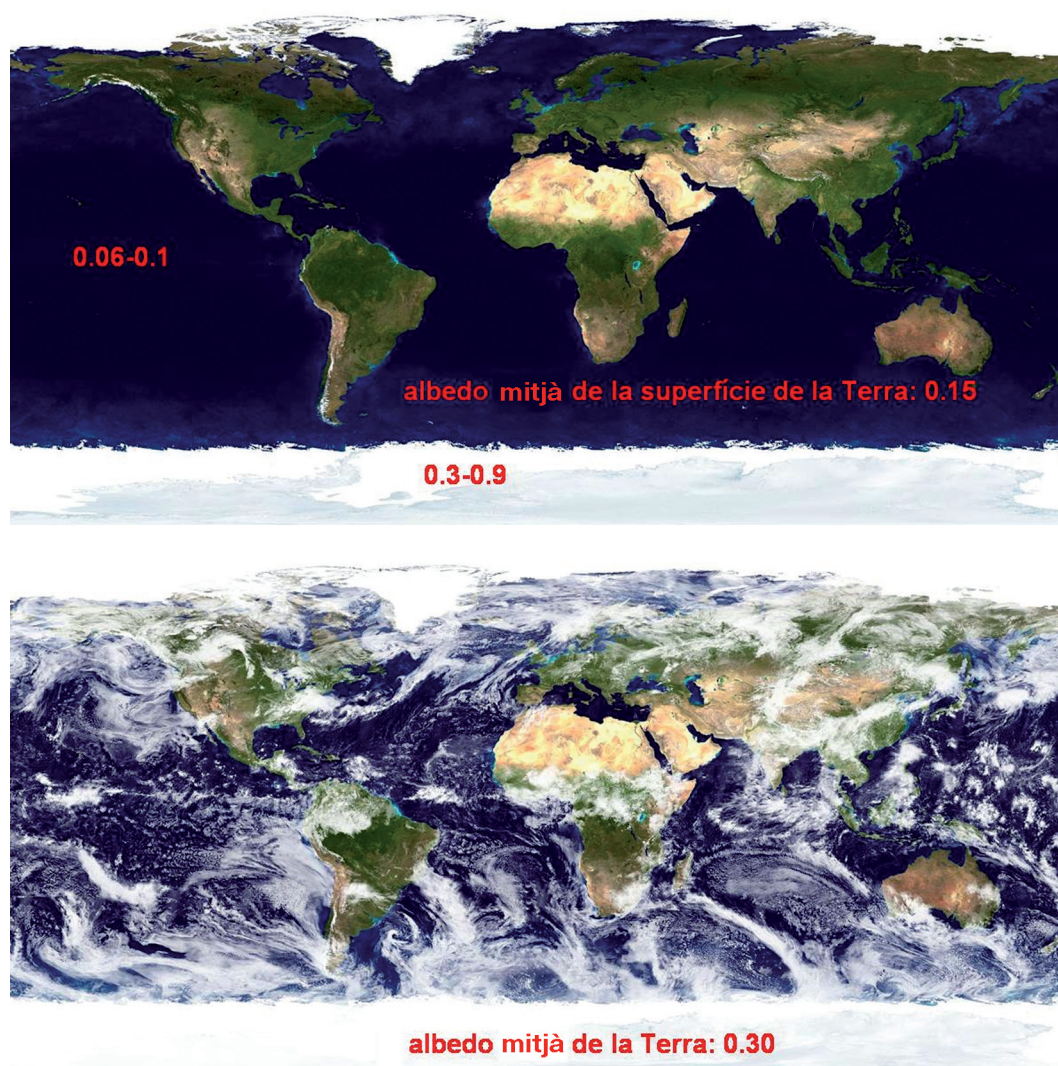


Figura 7. Imatges del visible del sensor MODIS instal·lat al satèl·lit Terra de la NASA. A dalt, la imatge ha estat manipulada per eliminar els núvols. Sobreescrits hi ha els valors de l'albedo dels oceans, del gel i la mitjana de la superfície de la Terra. A baix, la imatge real inclou l'albedo total de la Terra, notablement més alt per causa dels núvols.

L'albedo

Tothom sap que a l'estiu convé dur roba i gorra clares, i evitar de ficar-se en cotxes foscos, si no volem passar calor. La raó d'això és l'albedo. Definim l'albedo com la fracció de radiació solar que reflecteix la superfície d'un objecte. És, doncs, el contrari de la fracció de radiació solar que és absorbida per l'objecte i pot dissipar-se en forma de calor. Normalment l'expressem com a tant per u. L'albedo dels oceans i la vegetació, que són foscos, és baix, de l'ordre del 0,1, és a dir que reflecteixen només el 10% de la radiació que els arriba i n'absorbeixen el 90%. En canvi, l'albedo de la neu i dels núvols és alt, sovint superior al 0,5. L'albedo dels sòls depèn del color i la textura. En conjunt, l'albedo mitjà de la superfície de la Terra és força baix, del 0,15, perquè dos terços és ocupada pels oceans foscos. L'al-

bedo real del planeta és, tanmateix, del 0,30 (fig. 7). Aquesta diferència l'origenen els núvols. Els núvols cobreixen permanentment de blanc més d'un terç del planeta i n'eleva l'albedo fins al doble del valor que tindria si no hi fossin.

Núvols para-sol o núvols hivernacle?

Vaja, que sense núvols la Terra fóra molt més càlida perquè ens fan de para-sol. Però no hem sentit a dir als homes i dones del temps que les nits ennuvolades són menys fredes? No hem experimentat que els anticiclons d'hivern duen glaçades de nit perquè l'escalfor marxa? En què quedem, doncs, núvols para-sol o núvols hivernacle?

De fet, totes dues coses són certes. El comportament dels núvols respecte a la radiació solar i la calor (és a dir, respecte al balanç



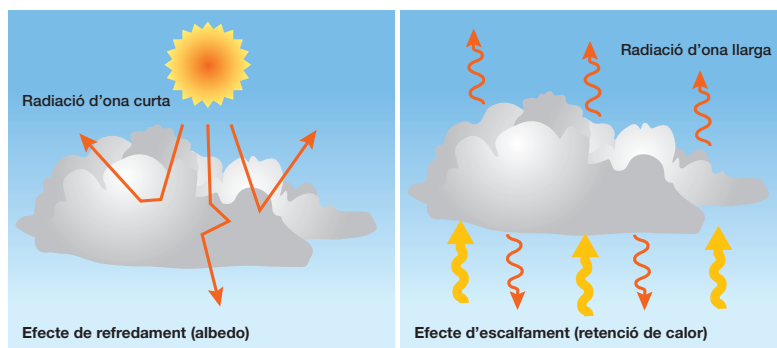
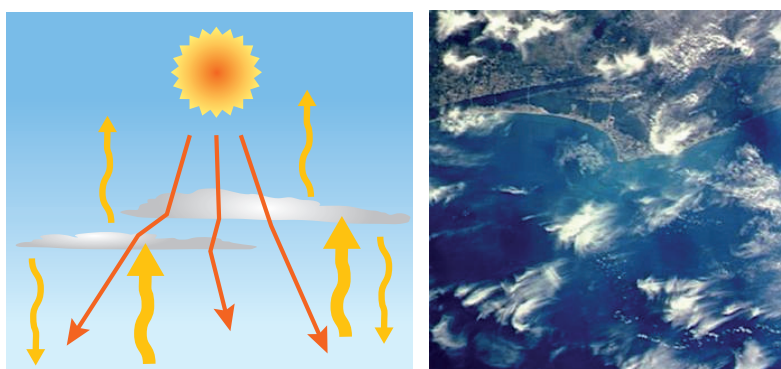
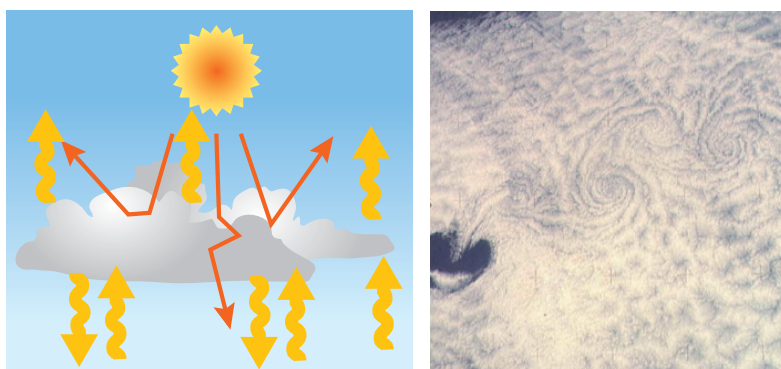


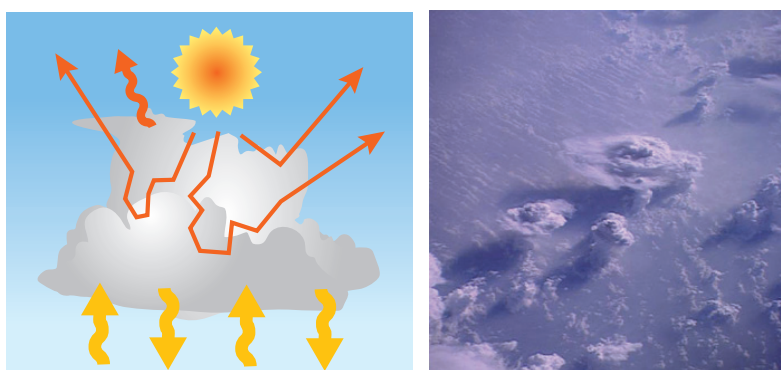
Figura 8. Paper dels núvols en el balanç d'energia. A dalt: els núvols reflecteixen part de la radiació d'ona curta que els arriba del Sol. A baix: al mateix temps, retenen part de la calor (radiació d'ona llarga) que dissipa la superfície de la Terra.



Núvols alts (retenció neta de calor)



Núvols baixos (refredament net)



Núvols convectius (neutrals)

Figura 9. Comportament de cada tipus de núvols respecte al balanç d'energia.



d'energia) depèn del tipus de núvol (figs. 8 i 9). Els núvols alts, els cirrus, sovint formats per cristallets de glaç, retenen més calor que no pas reflecteixen la radiació solar. Són núvols amb efecte net d'escalfament. Els núvols baixos, estrats i estratocúmulus, són millors reflectint la radiació que no pas retenint calor, de manera que tenen un efecte net de refredament. Els núvols convectius, els típics cúmulus i cúmulonimbus de tempesta, ofereixen un balanç d'energia pràcticament neutre. Malgrat aquest comportament heterogeni, en conjunt els núvols tenen un efecte de para-sol extraordinari, amb un forçament radiatiu negatiu de -20 W m^{-2} . Els que més àrea ocupen i que més tapen la superfície fosca dels oceans són els núvols baixos, els estrats marins. Qualsevol factor que influeixi en la formació i albedo d'aquests núvols juga, doncs, un paper fonamental en el balanç d'energia del planeta i, en conseqüència, en el clima.

Com es formen els núvols

És obvi que, perquè es formi un núvol, cal que hi hagi vapor d'aigua i que condensi. El que no és tan obvi, però, és que amb el vapor d'aigua no n'hi ha prou. Tot i trobar-se per sobre els nivells de saturació, el vapor d'aigua no condensa si no té microsuperfícies on fer-ho.

Une nouvelle propriété de l'air

L'any 1875, P.J. Coulier, professor en un hospital de París, va fer l'experiment que havia d'explicar el perquè i el com de la formació de núvols i boires. Va prendre un flascó de vidre gros, hi va posar un dit d'aigua, hi va connectar un tub d'entrada i un de sortida, i va aplicar un lleuger buit a la sortida amb una bomba de mà (fig. 10). La caiguda de pressió dins dels flascó feia expandir l'aire i el refredava. El vapor d'aigua que saturava l'aire condensava tot formant una boirina dins el flascó. Res de nou: la condensació del vapor formava un núvol. Coulier va observar que, si filtrava l'aire d'entrada perquè no tingués partícules, en aplicar el buit no es formava cap boirina. Sí que es formava, en canvi, si deixava entrar l'aire del laboratori. I, si afegia una càrrega extra de partícules a l'aire, la boirina que apareixia era molt més espessa. Coulier va publicar un treball al *Journal de Pharmacie et de Chimie*, titulat *Note sur une nouvelle propriété de l'air*, on afirmava que "perquè es formi una boira és necessari que hi hagi partícules fines suspeses en l'aire" (Coulier, 1875). Malauradament, el treball de Coulier no va arrelar en la comunitat científica fins que, cinc anys més tard, el meteoròleg anglès J. Aitken va realitzar i publicar un experiment idèntic. El curiós del cas és que Aitken no tenia notícia dels experiments de Coulier, però el 1880, en un article publicat a *Nature*, arribava a les

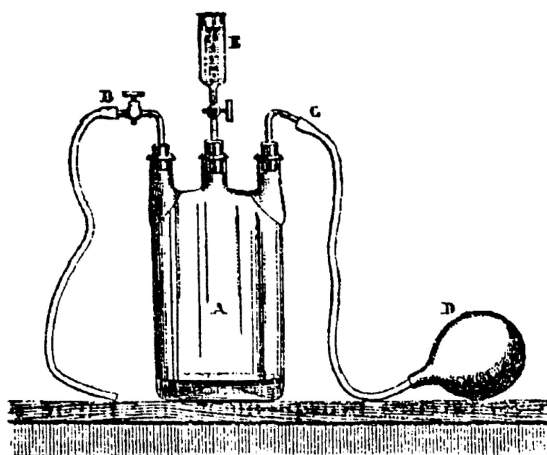


Figura 10. Dibuix del sistema ideat per Coulier per demostrar que calen partícules de l'aire (aerosols) perquè el vapor d'aigua condensi i formi un núvol. A: flascó de vidre; B: entrada de l'aire ambient; C: tub connectat a D: bomba de mà per fer un lleuger buit; E: dispensador d'aigua líquida. Dibuix original de P.J. Coulier (1875).

mateixes conclusions que el francès: "El vapor d'aigua condensa sobre nuclis sòlids; la pols de l'aire actua com a nucli de condensació; sense pols no hi hauria boires, ni boirines, ni núvols" (Aitken, 1880). Quan Aitken va conèixer els treballs de Coulier, no va tenir cap problema per reconèixer que el francès havia donat el primer pas (Spurny, 2000). Així i tot, i gràcies als seus treballs de recerca posteriors, al britànic se'l considera el pare de la investigació sobre les relacions entre aerosols i núvols.

Aerosols, núvols i clima

Dust in the wind

Allò que Coulier i Aitken, a finals del s. XIX, anomenaven *pols*, ara ho anomenem *aerosols*. Definim aerosol com petites partícules suspeses en l'aire. Poden ser de mida, composició i propietats òptiques ben diferents, depenent del seu origen i procés de formació. D'aerosols n'hi ha hagut sempre en la història de la Terra. De fet, de fonts naturals d'aerosols n'hi ha un munt (fig. 11): entre els *aerosols primaris* (aquells que existeixen en forma de partícula ja des de l'origen) hi ha els grans de pols que el vent aixeca als deserts i sòls lliures de vegetació, el sutge i cendres llançats pels incendis espontanis, les restes vegetals minúscules, o les partícules de sal i microorganismes marins llançades pels trençants de les ones; entre els *aerosols secundaris* (aquells que es formen per la transformació de gasos en partícules) hi ha els que provenen dels gasos de les erupcions volcàniques, o els que són fruit de l'oxidació de gasos produïts pels organismes vius, tant a terra com a mar.



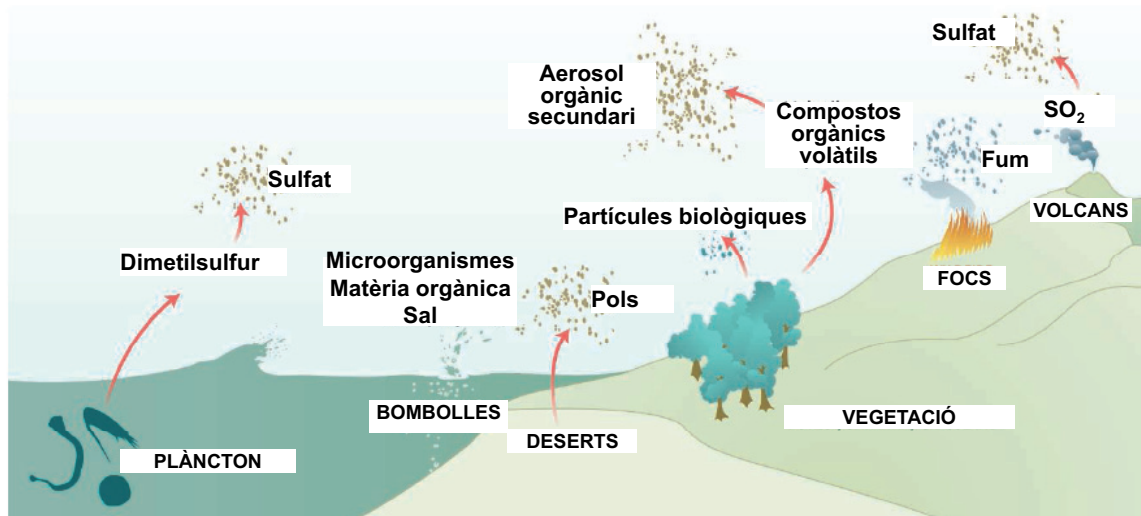


Figura 11. Fonts naturals d'emissió d'aerosols primaris i de formació d'aerosols secundaris (Andreae, 2007).

No cal dir que els humans som productors d'aerosols de primer ordre. Amb la desforestació i els canvis en els usos del sòl exposem més superfícies de terra al vent, la qual cosa fa que s'aixequi més pols. Però és sobretot la crema de combustibles fòssils la nostra principal font d'aerosols, tant primaris com secundaris. Les combustions imperfectes no només produeixen CO_2 i aigua, sinó també gran quantitat de carboni mal cremat (partícules de sutge, aerosol primari), de diòxid de sofre (SO_2) i de compostos volàtils de carboni i nitrogen (tots ells precursors d'aerosol secundari).

Els aerosols i el clima

Els aerosols representen un component més de l'aire i, com a tal, ajuden a configurar el funcionament de l'atmosfera com a reactor químic, transportador de substàncies, i peça clau en el balanç d'energia del planeta. Segons les seves mides i propietats, els aerosols intervenen en processos tan importants com la formació de núvols, l'absorció i dispersió de radiació solar, o el transport i deposició d'elements nutrients, contaminants, al·lèrgens i vectors de malalties. Avui ens interessen sobretot els efectes climàtics (Penner et al., 2001).

Efecte directe: Alguns aerosols, pel seu microalbedo baix, absorbeixen radiació solar i la dissipen en forma de calor. És el cas del sutge de combustió, que és de color negre. Aquests aerosols contribueixen a escalfar l'atmosfera. Altres aerosols amb un microalbedo alt, reflecteixen i dispersen la radiació solar i contribueixen, doncs, a refredar l'atmosfera. És el cas dels aerosols secundaris produïts per l'oxidació del sofre natural i antropogènic.

En conjunt, l'efecte directe net dels aerosols presents en l'atmosfera des de la Revolució Industrial és de refredament, amb un

forçament radiatiu negatiu proper als -0.5 W m^{-2} (fig. 6).

Efecte indirecte primer: Com ja hem explicat, els aerosols juguen un paper clau en la formació de núvols. Calen aerosols d'una mida adequada (entre $0,05$ i $1 \mu\text{m}$ de diàmetre) i de naturalesa higroscòpica perquè el vapor d'aigua hi condensi i formi gotetes. Però el paper dels aerosols no és tan sols el de condició necessària perquè els núvols es formin. Un núvol que condensa sobre poques partícules serà un núvol amb poques gotes que, per una quantitat de vapor d'aigua fixada, hauran de créixer i assolir mides més grosses. Per contra, en presència de molts aerosols, el núvol es formarà amb moltes gotes de mida més petita. Doncs bé, un núvol amb poques gotes i grosses és més transparent a la radiació solar, és a dir que té un albedo més baix i és pitjor com a para-sol. Un núvol amb moltes gotes petites té un albedo més alt. Això és el que hom anomena l'*efecte Twomey* en honor al seu descobridor.

Efecte indirecte segon: El núvol que es forma en presència de grans quantitats d'aerosol, és a dir amb moltes gotes, és un núvol que durarà més perquè les gotes trigaran més a assolir la mida que no els permet aguantar-se més en l'aire i les fa precipitar en forma de pluja. Si el núvol té una vida més llarga, més llarg és el temps que actua com a para-sol. Aquest s'anomena *efecte Albrecht*.

Conjuntament, els efectes indirectes dels aerosols (és a dir per mitjà de la influència que tenen en els núvols) des de la Revolució Industrial han suposat un refredament net molt important. Quantificar aquest refredament és molt difícil; de fet, és una de les fonts d'incertesa més grans que tenim en l'observació i la predicció del canvi climàtic (Duarte et al., 2006). Les estimes més acceptades anirien entorn del $-0,7 \text{ W m}^{-2}$, però podrien arri-



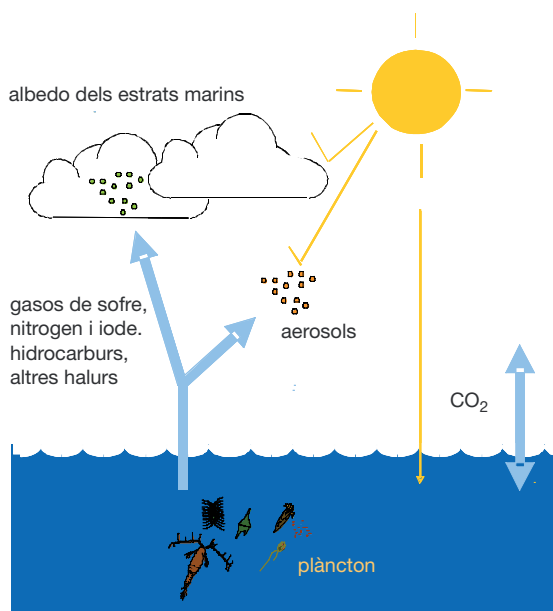


Figura 12. L'alè del mar. Els oceans, a més d'intercanviar CO₂ amb l'atmosfera, emeten una varietat de gasos, molts d'ells amb origen en el plàncton, que influeixen en les propietats químiques de la troposfera i que serveixen com a precursors d'aerosols i de núvols.

bar als $-1,8 \text{ W m}^{-2}$, és a dir, un valor proper però de signe contrari al de l'escalfament produït fins ara per l'increment antropogènic del CO₂ (fig. 6).

Els oceans en l'equació

L'alè del mar

Els oceans cobreixen més de dos terços de la superfície del planeta, amb una profunditat mitjana de vora els 4.000 m. Aquesta massa tan enorme d'aigua salada actua com a font principal de vapor d'aigua i com a dissolvent d'una part del CO₂ atmosfèric. A les regions polars, el CO₂ es dissol en l'aigua freda i s'enfonsa amb ella per quedar-se als corrents profunds durant períodes de desenes a milers d'anys. Hom estima que la meitat del

CO₂ que els humans hem anat emetent cap a l'atmosfera ara es troba al fons dels oceans. La majoria d'aquest CO₂ tornarà a l'atmosfera en aquestes escales de temps de què parlàvem, mentre se'n dissoldrà de nou. Només la matèria orgànica d'origen biològic que no es descompon i que arriba a dipositar-se als sediments marins i quedar-s'hi (que és només una petita part de la que genera l'activitat biològica a la superfície dels oceans) assegura que una mica del carboni desaparegui del cicle a llarg termini i no torni a l'atmosfera en els propers centenars de milers o milions d'anys (Simó et al., 2002).

Però l'oceà no intercanvia només CO₂ i vapor d'aigua amb l'atmosfera. L'alè del mar (Simó, 2004) és compost per una gran quantitat de substàncies volàtils o gasos amb propietats diferents (fig. 12). Alguns d'aquests gasos intervenen en la química de l'atmosfera, per fer-la més o menys oxidant, més o menys àcida, o per participar en la destrucció de l'ozó estratosfèric. D'altres retornen del mar als continents elements importants, com el iode o el sofre, que altrament els continents anirien perdent per efecte del rentat de la pluja. D'altres gasos són precursors d'aerosols secundaris i, per tant, intervenen en el balanç d'energia del planeta perquè ells mateixos reflecteixen la radiació solar o perquè ajuden a la formació de núvols. Entre aquests últims hi ha el iodur de metil (CH₃I), l'amoniac (NH₃), l'isoprè (C₅H₈) i d'altres hidrocarburs volàtils, i el dimetilsulfur ((CH₃)₂S o DMS).

L'olor del mar

El dimetilsulfur (DMS) és la forma de sofre volàtil més abundant, de llarg, a la superfície dels oceans. L'emissió de DMS a l'atmosfera representa la principal font natural de sofre a la troposfera, molt superior als volcans i als ecosistemes terrestres (taula 2). De fet, és un dels responsables de l'olor del mar, de l'agradable aroma del marisc. Fins i tot s'ha demostrat que alguns ocells marins poden detectar-ne l'olor tot volant, i la utilitzen com a pista per

Taula 2. Contribució de les fonts naturals i antropogèniques a l'emissió i la presència de sofre a l'atmosfera global.

Font	Emissions globals de sofre (TgS any ⁻¹) ^a mitjana (interval)	Contribució a les emissions (%)	Contribució al sulfat present ^b (%)
Humans	70 (60-100)	70	37
Volcans	7 (4-16)	7	18
Biota ^c	22 (15-50)	23	42 ^d

<10 continents en latituds mitjanes HN
<50-70 oceans no tropicals HN
>80 tròpics i tot l'HS

a: TgS: teragramms de sofre (milions de tones)

b: contribució a la quantitat de SO₄²⁻ que conté l'atmosfera.

c: inclou les emissions dels ecosistemes continentals i oceànics, >90% de les quals és DMS oceànic.

d: la contribució del sofre d'origen biològic (majoritàriament DMS) és del 42% de mitjana, però varia àmpliament entre regions del planeta, tal com mostra la columna de la dreta. HN: hemisferi nord; HS: hemisferi sud.



localitzar el plàncton i, amb ell, l'aliment. El lligam entre el DMS i el plàncton és molt estret perquè, de fet, el DMS és un subproducte de l'activitat dels microorganismes marins. Moltes algues unicel·lulars (components del fitoplàncton) fabriquen dimetilsulfoniopropionat ($(\text{CH}_3)_2\text{S}+\text{CH}_2\text{CH}_2\text{COO}^-$, DMSP), un compost que els és molt útil per sobreviure en un ambient tan estressant com són les aigües més superficials de l'oceà: són salades, amb dosis elevades de radiació ultraviolada i, sovint, amb falta d'elements essencials per créixer equilibradament i multiplicar-se. El DMSP resulta ser, a més, el precursor del DMS.

Un cop a l'atmosfera, el DMS s'oxida per formar petits aerosols sulfúrics que actuen com a nuclis perquè condensin les gotes d'aigua i es formin núvols. Com ja hem explicat, la mida i l'abundància de les gotes fan que el núvol duri més o menys i que reflecteixi més o menys la radiació solar. Com mostrava la figura 11, sobre o a prop dels continents no falten aerosols, i els núvols sempre tenen llavors per formar-se. Però sobre els oceans més remots, en les regions més allunyades dels continents, els aerosols són molt menys abundants, i el mar juga un paper fonamental en el proveïment de substàncies perquè es formin els núvols (Vallina et al., 2007a). El DMS emès pels oceans és una de les fonts principals d'aerosols sobre els oceans i contribueix, doncs, a refredar el planeta (Simó, 2001).

Canvi climàtic

La mar d'ensopit

Podria ser, doncs, que amb l'escalfament global, causat per l'increment de gasos d'efecte hivernacle, els oceans responguessin produint i emetent més quantitat d'aquesta substància refredant i, d'aquesta manera, frenant l'escalfament? Certament podria ser, però no sembla que sigui el cas. Si més no, no amb la magnitud que fóra necessària per reduir la velocitat d'escalfament d'una forma significativa. Aquesta és la conclusió d'un treball recent realitzat a l'Institut de Ciències del Mar de Barcelona (Vallina et al., 2007b). Hem utilitzat un model de l'oceà global i relacions empíriques desenvolupades gràcies a les dades obtingudes des de satèl·lits orbitals (Simó i Dachs, 2002; Vallina i Simó, 2007), i n'hem projectat el comportament tot simulant que els nivells de CO_2 atmosfèric augmentaven en un 50% d'aquí a l'any 2060. Amb el model preveiem que l'emissió de sofre refredant dels oceans, si bé ha d'augmentar en aquestes dècades, ho farà de forma molt modesta, de l'ordre de l'1,2% com a mitjana global i anual. Només en algunes regions tropicals aquest increment previst arriba a ser superior al 5%. Això suposa, globalment, un

forçament negatiu (de refredament) igual o inferior al 2% de l'escalfament previst per causa de l'increment de CO_2 .

La paradoxa dels aerosols

No sembla que les emissions naturals d'aerosols formadors de núvols hagin d'augmentar enormement amb el canvi climàtic, si més no sobre els oceans. I els aerosols antropogènics? Aquests constitueixen una de les grans paradoxes tant de la ciència com de la política d'actuació davant del canvi climàtic. La crema de combustibles fòssils és alhora font de CO_2 i d'aerosols, i ja hem vist (fig. 6) i explicat que la presència d'aerosols antropogènics proporciona a l'atmosfera un forçament radiatiu negatiu (de refredament) molt considerable. Però els aerosols tenen, a banda dels efectes climàtics, altres efectes no desitjats: afeccions respiratòries en humans altament exposats, el deteriorament del patrimoni cultural i natural per causa de partícules àcides, i la introducció de contaminants a les cadenes alimentàries de regions receptores allunyades dels focus d'emissió. Per combatre aquests efectes, hom persegueix la introducció de *tecnologies de combustió netes*, que han de reduir les emissions de partícules i de gasos precursors d'aerosols. La paradoxa rau en el fet que, si ens continuem basant en la combustió de matèria orgànica (inevitablement productora de CO_2) per produir energia, però n'eliminem l'emissió d'aerosols, continuarem incrementant els nivells de CO_2 atmosfèrics (amb conseqüències d'escalfament) però reduïrem els nivells d'aerosols (amb pèrdua de refredament), la qual cosa accelerarà encara més l'escalfament. Les tecnologies de combustió netes no són una solució a l'escalfament; al contrari, poden accelerar-lo. La veritable solució radica en substituir la combustió per altres fonts d'energia no productores de gasos d'efecte hivernacle.

Conclusió

Els models actuals utilitzats en els estudis de canvi climàtic preveuen una pèrdua gradual de la capacitat dels oceans per dissoldre el CO_2 atmosfèric i, per tant, per alentir l'acumulació d'aquest gas a l'atmosfera. A això hem de sumar la previsió que l'emissió natural de precursors d'aerosols formadors de núvols sobre els oceans no augmentarà gaire. I, finalment, que les emissions humanes d'aerosols sí que poden disminuir dràsticament. Tot plegat apunta en una mateixa direcció: alguns dels mecanismes més importants que avui alenteixen l'escalfament global perdran força. Un mínim principi de precaució ens obliga, doncs, a desenvolupar les capacitats i la voluntat per reduir les emissions de gasos



d'efecte hivernacle i per aplicar estratègies d'adaptació a uns canvis que, en una o altra mesura, semblen inevitables.

Agraïments

Agraeixo a l'Arancha Lana haver-me ajudat en la recerca sobre la història del descobriment dels nuclis de condensació de núvols, i al Jordi Corbera el cop de mà amb algunes de les figures. Aquest és un treball del Grup de Recerca en Biogeoquímica marina i Canvi Global, finançat per la Generalitat de Catalunya.

Bibliografia

- AITKEN, J. (1880). On Dusts, Fogs and Clouds. *Nature*, Feb.: 384-385.
- ANDREAE, M.O. (2007). Aerosols before pollution. *Science*, 315: 50-51.
- ARRHENIUS, S. (1896). On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. *Philosophical Magazine*, 41: 237-276.
- COULLIER, P.J. (1875). Note sur une nouvelle propriété de l'air, *Journal de Pharmacie et de Chimie, Paris, Ser. 4, 22*: 165-173.
- DUARTE, C.M., ALONSO, S., BENITO, G., DACHS, J., MONTES, C., PARDO, M., RIOS, A.F., SIMÓ, R. i VALLADARES, F. (2006). *Cambio Global. Impacto de la actividad humana sobre el sistema Tierra*. Colección Divulgación. CSIC, Madrid.
- FORSTER, P. et al. (2007). Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. A: SOLOMON, S., QIN, D., MANNING, M., CHEN, Z., MARQUIS, M., AVERYT, K.B., TIGNOR, M. i MILLER, H.L. (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*. Cambridge University Press, Cambridge i New York.
- KEELING, C.D. (1960). The Concentration and Isotopic Abundances of Carbon Dioxide in the Atmosphere, *Tellus*, 12: 200-203.
- Projecte EPICA (*European Project for Ice Coring in Antarctica*), www.awi-bremerhaven.de/GPH/EPICA/
- SIMÓ, R. (2001). Production of atmospheric sulfur by oceanic plankton: biogeochemical, ecological and evolutionary links. *Trends in Ecology and Evolution*, 16: 287-294.
- SIMÓ, R. (2004). L'alè del mar. Intercanvis oceà-atmosfera i Canvi Global. A: MARRASÉ, C. i LLEBOT, J.E. (eds.), *Un tast de Canvi Global. Treballs de la Societat Catalana de Biologia*, 54: 39-50.
- SIMÓ, R. i DACHS, J. (2002). Global ocean emission of dimethylsulfide predicted from biogeophysical data. *Global Biogeochemical Cycles*, 16: 1078, doi: 10.1029/2001GB001829.
- SIMÓ, R., GASOL, J.M. i GILI, J.M. (2002). L'Oceà i el Canvi Global. *Mètode*, 34: 23-38.
- SPURNY, K.R. (2000). Atmospheric Condensation Nuclei. P.J. Coullier 1875 and J. Aitken 1880 (Historical Review). *Aerosol Science and Technology*, 32: 243-248.
- VALLINA, S.M. i SIMÓ, R. (2007). Strong relationship between DMS and the solar radiation dose over the global surface ocean. *Science*, 315: 506-509.
- VALLINA, S.M., SIMÓ, R., GASSÓ, S., DE BOYER-MONTÉGUT, C., DEL RIO, E., JURADO, E. i DACHS, J. (2007a). Analysis of a potential "solar radiation dose-dimethylsulfide-cloud condensation nuclei" link from globally mapped seasonal correlations. *Global Biogeochemical Cycles*, 21, GB2004, doi:10.1029/2006GB002787.
- VALLINA, S.M., SIMÓ, R. i MANIZZA, M. (2007b). Weak response of oceanic dimethylsulfide to upper mixing shoaling induced by global warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 104: 16004-16009.

