

UN BREU RELAT SOBRE ELS ALBORS DE LA RECERCA SOBRE EL CANVI DEL CLIMA

Josep Enric Llebot

Departament de Física, Universitat Autònoma de Barcelona

SOME NOTES ABOUT THE DAWN OF CLIMATE RESEARCH. This work brings a brief review of the beginnings of the interest to the study of issues related with anthropogenic climate change. The main events, such as the work of Fourier about greenhouse effect or the first energy balance model used by Svante Arrhenius, are revised until the first instrumental measurements of the rising concentrations of atmospheric carbon dioxide at Mauna Loa Observatory (Hawaii).

Introducció

Les perturbacions que les nostres activitats produeixen sobre el funcionament conjunt de l'atmosfera, de l'oceà, de la biosfera, de la coberta de gel i dels sòls, el que anomenem ras i curt, canvi climàtic no és un tema recent, encara que ens ho sembli. La història està plena de persones que han pensat sobre el clima i que n'han tret les seves conclusions que, al cap i a la fi, ens han portat on som ara, on el clima ocupa pàgines senceres de diaris, d'espais de televisió, de programes polítics i de reunions internacionals, on desenes de revistes científiques se n'ocupen i on cada vegada grups més importants d'investigadors hi treballen. Durant la petita i no tan curta història del coneixement sobre el funcionament del sistema climàtic s'ha anat repetint el plantejament d'alguns problemes i de les seves respostes amb tres visions diferents que, modulades pel coneixement i la tecnologia, s'han anat consolidant. Esquemàticament aquestes visions es poden resumir de la forma següent:

Visió tradicional – popular. És molt comuna i recorre a la tradició, a l'autoritat, a la literatura, als relats dels exploradors o a la memòria personal o de les persones grans. És una visió retòrica i no gaire científica ja que no es basa en mesures ni en dades indirectes obtingudes de mesures sinó en escrits més o menys poc concrets. Raonaments d'aquests tipus portaren a pensar, analitzant textos clàssics, que durant l'Imperi romà la temperatura fou considerablement inferior a l'actual. Avui l'utilitzem quan afirmem que el clima ha canviat perquè quan érem joves plovia més o feia més fred. Els records sobre dades ambientals no serveixen ja que subjectivament es recolzen en els records d'es-

deveniments extrems que no pas en comportaments regulars del clima.

Visió estadística. Consisteix a utilitzar dades de moltes estacions meteorològiques, estudiar-les i treure'n regularitats. Històricament el problema que hi ha és que fins ben entrat el segle XIX no es tenen sèries de dades suficientment extenses i bones i, en aquest cas, no es té garantia d'homogeneïtat entre les dades preses en un lloc o en un altre. Actualment la qüestió és ben diferent. Hi ha nombroses estacions de mesura repartides per tot el planeta, sobretot a les zones continentals, i també hi ha enginyers espacials que proporcionen mesures globals que poden ser analitzades amb sofisticades tècniques estadístiques. Corresponen a aquesta metodologia les afirmacions que la temperatura ha augmentat 0,6°C durant el segle XX, que en un determinat indret la precipitació ha disminuït un percentatge donat o que la concentració de diòxid de carboni a l'atmosfera ha augmentat, des de l'inici de la industrialització un 35%.

Visió de primers principis. Amb els treballs de Joseph Fourier, John Tyndall, Svante Arrhenius, Milutin Milankovitch, Roger Revelle, Guy Stewart Callendar, Hans Suess, Wallace Broecker, George Philander i de molts altres científics anònims s'estableix com el clima hauria de canviar a partir dels primers principis. Aquesta posició és molt forta, però té l'inconvenient que l'anàlisi científica tendeix a aïllar els processos i en canvi el comportament del clima està fortament acoblat i depèn de múltiples causes. Aquesta visió ha estat majoritària durant el segle XX.

En el que segueix farem una breu aproximació històrica d'allò que ha estat més significatiu per entendre l'estat actual del coneixement sobre el canvi climàtic.



Els inicis?

Podem cercar una visió climàtica a la mitologia clàssica. Com ho explica el professor Jaume Terradas (2006) al llibre *Biografia del món*, simbòlicament podem dir que la mitologia grega aporta una primera visió del canvi del clima per causes antròpiques. En el seu llibre *Relats de mitologia: Els déus* ens ho explica Maria Àngels Anglada (1996): Helios, el Sol; Eos, l'Aurora, i Selene, la Lluna eren germans. El Sol menava una quadriga divina: quatre cavalls alats, en un carro d'or que cada dia sortia de l'Oceà, a llevant, travessava la volta del cel i tornava al mar per ponent. El Sol era tan bell que cap nimfa es negava a ser la seva amant, i així va tenir una munió de fills. Faetont era fill d'Helios i Climene, una oceànida. Quan Faetont, ja adolescent, va a presentar-se davant del seu pare, aquest veient-lo tan bonic, fort i ple de potencialitats, a l'igual de com procediríem molts pares actuals, va prometre de concedir-li un desig. Faetont enlluernat pels cavalls i el carro d'or li va demanar al seu pare conduir el carro del Sol. Helios va veure amb preocupació que el seu fill no podria dominar la quadriga, però un Déu no podia negar-se a complir la seva paraula. El jove va agafar les regnes, però no podia dominar els cavalls, de caràcter molt fort atesa la difícil missió d'arrossegar pel firmament el carro de foc. Com passa a vegades, el resultat fou pitjor fins i tot del que s'esperava. Faetont no en sabia gens de conduir i dominar el carro de flames i en el foll camí que els quatre cavalls alats el feren seguir es va acostar massa a la Terra i va produir-hi un gran escalfament, nombrosos incendis als boscos i va dessecar-hi rius i llacs. Helios veia impotent com el seu fill creava aquells desastres, però va haver de ser Zeus, el Déu dels déus qui finalment, veient la imprudent acció del jove conductor del desbocat carro, enviés el seu llamp reparador, matés a Faetont i apartés el carro del seu devastador camí. Aquest episodi mitològic recull bé, de forma imaginativa i poètica la importància del Sol en el funcionament del sistema climàtic, però també de forma metafòrica els fets dels éssers humans.

Els inicis històrics

La visió climatològica fins a finals del segle XVIII la podríem dividir en dos entorns, el naturalista i el meteorològic. El naturalista s'alimenta de les trobades de fòssils i de les preguntes que sobre les glaceres i l'estructura de les valls alpines es feien els pioners naturalistes i exploradors. L'entorn meteorològic es recolza moltes vegades en impressions o en dades poc científiques ja que encara eren pràcticament inexistents els llocs on es mesuraven algunes variables elementals com la temperatura o la

pluviometria de forma regular. A finals del segle XVIII comencen les observacions sistemàtiques del temps a Alemanya, Rússia i als Estats Units en aquesta època és quan es comencen a fundar alguns dels serveis meteorològics nacionals (Fleming, 1998).

A finals del segle XV Leonardo da Vinci ja havia criticat la visió simplista sobre la naturalesa que portava, segons ell, a interpretacions completament errònies. En aquest període encara era molt present la influència del mite bíblic del diluvi per explicar moltes de les coses que es veien i es trobaven a la superfície terrestre. La interpretació literal dels textos bíblics que situava l'edat de la Terra en uns sis mil anys i la visió antropocèntrica portaven a fer errades monumentals com la que es va donar en la interpretació d'un fòssil *Homo diluvii testis* (Bard, 2004) com les restes fraccionàries d'un home ofegat per les aigües del diluvi, quan en realitat l'esquelet corresponia a una salamandra gegant.

Pel que fa a l'entorn meteorològic constatem un discurs, que formulà l'any 1799 Noah Webster, que s'ha anat repetint i que, ara en plena era tecnològica, a vegades encara es formula. La sensació que es tenia aleshores era que cada vegada feia més calor, com ens passa ara, en ple segle XXI. L'any 1799, Noah Webster escrivia criticant com moltes persones influents de l'època veien el clima d'Europa i Amèrica, especialment pel que feia a la temperatura de l'hivern, que opinaven que s'havia fet més càlida (Webster, 1810).

La gent comet nombrosos errors extraient conclusions generals a partir de fets particulars com quan Lady Montague seu davant la seva finestra oberta, el gener de 1718, i conclou que pràcticament no fa hivern a Constantinopla. Aquesta manera de procedir té molt poca lògica. Els grangers del Riu Connecticut varen poder llaurar els seus camps el febrer de 1779 i aquell any hi va haver molt bona collita de préssecs a Pennsilvània però això, vol dir alguna cosa? Són i seran tots els propers hiverns suaus a Amèrica? De cap manera! L'any següent, no només els rius sinó les badies i el mar a la costa es gelaren.

Per tant, la visió que circumstàncies particulars i esdeveniments singulars són indicadors de comportaments climàtics ha estat i està molt arrelada en la percepció sobre el comportament climàtic.

Es coneix Georges Cuvier pel seu paper molt important en el desenvolupament de la paleontologia. Tot i que era un opositor aferrissat de les teories evolucionistes, Cuvier va cercar una explicació de l'extinció d'algunes espècies, fonamentada en el descobriment de restes fòssils d'animals desapareguts, i li va atribuir a desastres ambientals. Per primera vegada, aleshores, s'usa el plural en comptes d'una única catàstrofe, com representava el



diluvi universal. Cuvier identifica correctament restes de mamuts i de rinoceronts gegants, actualment extingits, que es varen exhibir al museu de Sant Petersburg durant el segle XIX, i proposa l'existència de catàstrofes sobtades com inundacions, ascensos del nivell del mar i grans nevades que varen propiciar la conservació no només d'ossos sinó també de restes de pell i de carn congelades, que si els canvis s'haguessin produït esglaonadament no s'haurien conservat.

La profusió de persones cultes que viatjaven, observaven i col·leccionaven mostres de la natura acosta la història de la percepció de qüestions relacionades amb la climatologia a la geologia. Una regió tradicionalment visitada i observada era la dels Alps i, justament, en algunes valls alpines s'observà la presència, a l'eix de la vall, de grans blocs de granit sobre terrenys argil·losos i turons formats per restes de roques d'origen glacial anomenades morenes. S'observà que els blocs de granit tenien les mateixes característiques geològiques que zones properes als pics i es va concloure que s'havien desplaçat d'aquestes zones, desenes i en alguns casos centenars de quilòmetres. La pregunta era com. Es va tornar a recórrer a la teoria del diluvi, i es va atribuir al transport de materials sòlids gràcies a la força d'arrossegament de l'aigua. Però la grandària d'alguns blocs i també en alguns d'ells la col·locació va fer pensar que l'aigua no podia ser l'únic mecanisme. El geòleg escocès Charles Lyell basant-se en observacions d'exploradors de regions polars va formalitzar la teoria del transport de les roques per les geleteres. La pregunta immediata que es formulà fou quina era la causa de la variació de l'extensió de les glaceres perquè els registres històrics i documentals de l'època ja constataren variacions importants durant l'època històrica dels rius de gel.

El començament de veritat

Pel que fa a l'efecte d'hivernacle, simbòlicament, podríem dir que la història comença l'any 1824, quan l'enginyer francès Sadi Carnot publica el seu treball *Reflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance* on diu "És a la calor que s'han d'atribuir els grans moviments que caracteritzen la Terra; és a ella que es deuen les agitacions de l'atmosfera, l'ascens dels núvols, les pluges i altres meteos, els corrents de l'aigua per la superfície del globus de les quals l'home n'utilitza una petita part; fins i tot el tremolar de la Terra i les erupcions volcàniques es deuen al calor".

Tanmateix, tot i que conceptualment Sadi Carnot és molt important no només per a la física sinó també pel que avui anomenaríem les ciències ambientals, ja que els seus estudis

porten al reconeixement dels límits d'aprofitament dels recursos energètics, la seva referència al funcionament de la Terra no va anar gaire més enllà. El mateix any 1824 fou el físic Jean Baptiste Joseph Fourier (1824), qui proporcionà una visió pionera pel que fa al paper energètic de l'atmosfera en un article publicat com a resum d'una intervenció seva davant de l'Acadèmia Francesa de les Ciències i fonamentat en treballs previs duts a terme i publicats entre 1807 i 1809 sobre l'escalfament del planeta i el moviment periòdic del sistema solar, on va resumir les seves consideracions sobre el que avui anomenem efecte d'hivernacle. Així escrivia Fourier sobre la temperatura de la Terra "“*La Terra rep els raigs del Sol, els quals penetren la seva massa i es converteixen en calor no lluminós. La Terra posseeix el calor intern amb què fou creada, el qual contínuament és dissipat a la seva superfície i, finalment la terra rep els raigs de llum i de calor d'innombrables estrelles, entre les quals hi ha el sistema solar. Aquestes són les tres causes generals que determinen la temperatura de la Terra.*” i sobre la Terra i el sistema solar: "“*...està col·locat en una regió de l'univers on tots els punts tenen una temperatura comuna i constant, determinada pels raigs de llum i de calor que envien tots els astres de l'entorn. La Terra està així submergida en la temperatura freda del cel planetari i, d'altra banda, s'escalfa pels raigs solars la distribució diferent dels quals produeix la diversitat del clima*”". També escriví Fourier "“*la temperatura augmenta per la interposició de l'atmosfera, ja que el calor troba menys obstacle en penetrar per l'aire quan és llum, que quan l'ha de travessar convertida ja en calor fosca*”".

Fourier fou un personatge molt inquiet amb interessos diversos i amb facultats àmplies. Potser és més conegut per les sèries de Fourier, una tècnica matemàtica àmpliament utilitzada que s'utilitza per representar sèries periòdiques complexes mitjançant l'addició de sèries simples sinusoidals. Potser una de les seves obres cabdals fou el seu llibre sobre la *Teoria analítica de la calor* (Fourier, 1822) tot i que Lord Kelvin la va descriure com un gran poema matemàtic. Fourier fou un egipciòleg i un científic. Fou també professor de matemàtiques, policia secret, presoner polític, governador d'Egipte, prefecte de Isère i Rhône, baró, amic de Napoleó i secretari i membre perpetu de l'Acadèmia Francesa de Ciències. També s'atribueix a Fourier la primera advertència que les activitats humanes poden influenciar el clima. Afirmava Fourier "“l'establiment i el progrés de les societats humanes, l'acció de les forces naturals, poden canviar notablement i en vastes contrades, l'estat de la superfície del sòl, la distribució de les aigües i els grans moviments de l'aigua. Aquests efectes són propis de fer variar, en el curs de molts segles, el grau



de calor mitjà” Tanmateix la idea que les activitats humanes afecten el comportament de l’atmosfera ja es documenta en el filòsof Teofrast, deixeble d’Aristòtil, que va sospitar que canvis en els usos de zones del territori per augmentar la superfície cultivable, com el drenatge de zones humides o l’eliminació de boscos, comportaven canvis en els períodes de fred o de calor d’una determinada zona. També David Hume, dos mil anys més tard, va suggerir també que els canvis climàtics a Europa podien ser causa de l’avenç de la superfície cultivable (Fleming, 1998).

Tyndall i les propietats radiatives dels gasos

Durant la segona meitat del segle XIX és quan podem dir que s’estableixen els primers passos del que és el camp de la recerca sobre el canvi climàtic avui. Tant John Tyndall com el suec Svante Arrhenius, al qual ens referirem després, van tenir amplis interessos científics i varen realitzar les seves singulars recerques climàtiques únicament com un dels seus nombrosos camps d’investigació. Ben diferent és la situació actual en què la recerca és, necessàriament, molt especialitzada i hi ha un gran nombre de científics, instituts i organitzacions dedicats a la recerca sobre el clima.

John Tyndall va néixer a Irlanda i era enginyer de formació. Va treballar en les propietats magnètiques dels cristalls, la transmissió de la calor a través d’estructures orgàniques, les propietats físiques del gel i les propietats radiatives dels gasos, entre les quals especialment estudiava l’absorció en la regió de l’infraroig pròxim i a temperatures molt diferents de les que es donen a l’ambient terrestre. Era molt aficionat a l’excursionisme i motivat per les seves excursions a les geleres alpines, l’any 1854 va començar a interessar-se per l’estudi de problemes de geologia, especialment sobre qüestions relacionades amb la pressió i la pissarra. L’any 1859 Tyndall començà una sèrie notable d’experiments sobre les propietats radiatives de diversos gasos. Va establir i va publicar que l’absorció de la radiació terrestre pel vapor d’aigua i pel diòxid de carboni presents a l’atmosfera, té importància en l’explicació de fenòmens meteorològics com el refredament nocturn, les gebrades i les gelades i, possiblement, la variació dels climes durant el passat geològic (Tyndall, 1861).

Per conèixer les propietats que avui anomenem radiatives dels gasos Tyndall va usar un espectròmetre del seu propi disseny, que essencialment contenia un tub que omplia amb diferents gasos a diferent pressió i a través del qual feia passar la calor –radiant que vindria a correspondre d’alguna manera al que avui s’anomena radiació terrestre o radiació

d’ona llarga– generada per un cub ple d’aigua bullint. La calor radiant que passava pel tub es comparava amb la que anava directament al termoparell (un dispositiu que utilitza l’efecte termoelèctric que va descobrir Thomas Seebeck l’any 1821 i que està format per dues soldadures que uneixen dos materials semiconductors determinats. Si les dues soldadures estan a temperatures diferents es genera una diferència de potencial que es pot mesurar de manera senzilla mitjançant un galvanòmetre) i si era diferent volia dir que el gas absorbia la radiació d’ona llarga. En primer lloc Tyndall ho provà, lògicament, amb els gasos majoritaris a l’atmosfera, el nitrogen i l’oxigen i naturalment no se’n va sortir, ja que aquests gasos són pràcticament transparents a la radiació d’ona llarga. Quan estava decidit a deixar l’experiment ho provà amb gas de carbó. Aquest gas es generava a partir del carbó i s’usava per il·luminar i, per tant, el tenia accessible al laboratori. El gas de carbó era essencialment metà i aquest producte industrial li serví per constatar que absorbia la radiació. Després dels seus experiments Tyndall trobà que el vapor d’aigua, el diòxid de carboni, el metà, l’òxid nítrós, diverses molècules orgàniques, compostos halogenats i l’ozó absorbién la radiació. També observà que l’absorció depèn de la pressió i que arriba un moment que se satura. Dels seus experiments Tyndall va concloure que el gas amb efecte d’hivernacle més important és el vapor d’aigua i assenyalà de manera rotunda la seva importància cabdal en la meteorologia, presentant evidències a partir de dades meteorològiques que mostraven com la variació de la temperatura nocturna estava correlacionada negativament amb la humitat ambiental.

Tyndall també intentà explicar el color del cel treballant en la polarització i la difusió de la llum per molècules d’aire i pols. Naturalment les condicions ambientals, científiques i materials el van influir, i l’atmosfera plena de pols i pol·lució del Londres de mitjan del segle XIX va ajudar Tyndall, aleshores ja membre de la Royal Society de Londres, a plantejar-se i a plantejar d’una forma brillant, però prudent, la idea revolucionària que els canvis de la temperatura del planeta associats a les variacions dels constituents actius de l’atmosfera, pel que fa a la seva radiació, podien haver produït algunes de les variacions del clima que els geòlegs havien constatat. La idea es va anar formulant propiciada pel treball de pensadors que intentaven interpretar la presència en els valls alpins de roques procedents de zones més altes segons a la dinàmica de les glaceres i, certament, si les glaceres en altres períodes geològics havien ocupat posicions diferents, hom es preguntava quina podia ser la causa d’aquestes fluctuacions en la posició de les glaceres. En aquest context, Jacques



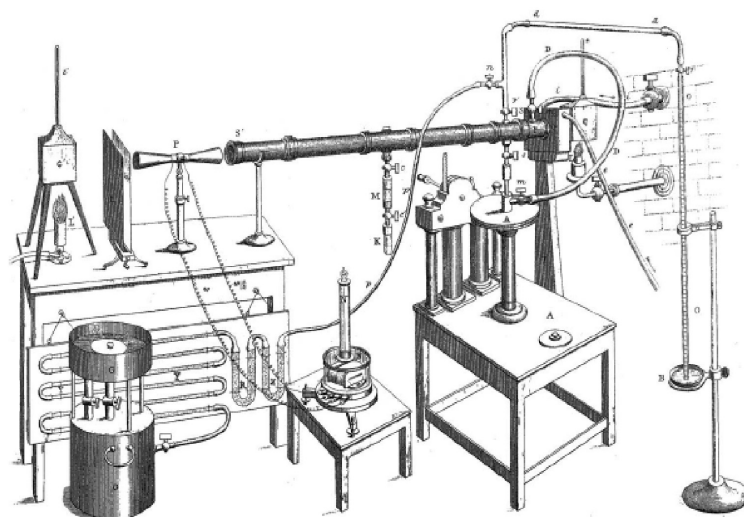


Figura 1. Espectròmetre dissenyat per John Tyndall. L'instrument consisteix en un tub llarg que s'omple d'un gas de pressió. Els dos extrems del tub estan tancats per un cristall de roca transparent. A un extrem del tub es posa un recipient amb aigua bullint que produeix una radiació que convenientment filtrada entra per l'extrem dret del tub i surt per l'altre, entrant en un dispositiu on hi ha un termoparell que dona una diferència de potencial si la radiació que entra pels seus extrems no és la mateixa. Font: J. Tyndall, "Heat a Mode of Motion", 1st ed., D. Appleton, New York, 1863

Joseph Ebelmen professor de l'escola de mines de París atribuïa, l'any 1845, a canvis en el cicle de carboni, canvis en la composició atmosfèrica i, com a conseqüència directa, canvis en el clima de la Terra (Ebelmen, 1845). La qüestió que sorgia immediatament és què havia produït els canvis en el cicle del carboni, i un altre prestigiós geòleg, Charles Lyell, es plantejava si la proposta de James Croll que es devien a canvis en els paràmetres orbitals de la Terra, era acceptable.

Tanmateix la geologia, com tota la història natural, era objecte d'apassionades discussions. A l'època que Tyndall explorava minuciosament les propietats radiants del vapor d'aigua i del diòxid de carboni, les declaracions de Louis Agassiz sobre els períodes glacials de la història climàtica de la Terra havien produït acalorades discussions científiques. Encara haurien de passar molts anys abans que el món científic i també l'opinió pública acceptessin l'alternança de períodes càlids i de períodes freds en el decurs de la immensa història de la Terra i de les espècies que l'habituen, i s'encetés el debat de si estaven causats per processos interns o externs a la Terra.

Malgrat tot, les propostes de Tyndall no varen cridar gaire l'atenció, ja que ningú s'imaginava en aquell temps, que uns constituents tan minoritaris en la composició atmosfèrica, com el vapor d'aigua o el diòxid de carboni, poguessin desequilibrar el balanç energètic de l'atmosfera i induir la transició d'un clima càlid a un clima fred, encara que fos en milers d'anys. Altres consideracions reberen molta més atenció, com les causes astronòmiques formulades força anys més tard per Milutin Milankovitch. Avui, la paleocli-

matologia és una component interdisciplinària imprescindible per a la comprensió del clima, i podríem dir que Tyndall fou un dels seus iniciadors.

L'inici del pensament sobre el canvi climàtic?

Fins fa poc, Svante Arrhenius era conegut únicament per les seves contribucions en el camp de l'electroquímica per les quals fou guardonat l'any 1903 amb el premi Nobel de Química. Arrhenius va néixer a Uppsala Suècia, l'any 1859, justament quan John Tyndall realitzava els experiments sobre l'absorció de la radiació per alguns gasos atmosfèrics. A la universitat va completar el seu primer títol en física i començà a preparar el que aleshores es coneixia com llicenciat en filosofia. Quan Arrhenius acabà els seus estudis va marxar cap a Estocolm a treballar a l'Institut de Física de l'Acadèmia Sueca de Ciències amb Erik Edlund, un professor de física interessat en la meteorologia.

A Estocolm, Arrhenius estudià química amb Otto Petterson i utilitzà els seus coneixements de física en l'anàlisi de problemes d'electroquímica que culminaren en una tesi escrita sobre la teoria química dels electrolits que publicà el 1884. Després de completar la seva teoria sobre la dissociació electrolítica i després d'un llarg període postdoctoral de sis anys, Arrhenius obtingué la seva primera posició estable com a professor de física a l'Escola Superior d'Estocolm. A banda de l'estabilitat que li proporcionà, aquesta posició li permeté disposar d'un laboratori mitjançant el qual va completar el seu treball d'electroquí-



mica. Fundà, aleshores, la Societat de Física d'Estocolm, de la qual fou el primer secretari. Arrhenius morí l'octubre de l'any 1927 a Estocolm. És important el paper que juga la Societat de Física d'Estocolm en l'estímul de l'interès d'Arrhenius en la física de la Terra, del mar i de l'atmosfera. El contacte científic amb geòlegs, meteoròlegs i oceanògrafs va fer interessar Arrhenius en alguns problemes plantejats d'aquestes ciències. La seva formació en física i química li permeté fàcilment introduir-se en l'anàlisi teòrica de fenòmens elèctrics de l'atmosfera, com l'estudi dels llamps i l'estudi de les influències del Sol i de la Lluna en l'estat elèctric de l'atmosfera, o en el desenvolupament d'una teoria sobre la formació del sistema solar. No s'interessà gaire per les observacions i els experiments i la major part del seu treball fou teòric, aplicant els seus coneixements a observacions i mesures, molt limitades aleshores, realitzades per altres.

Fou l'any 1895 quan Arrhenius presentà un treball a la Societat de Física d'Estocolm, una comunicació, avui considerada pionera, on suggeria que una reducció o un augment d'un quaranta per cent en la concentració d'un constituent menor de l'atmosfera, el diòxid de carboni, podia desenvolupar retroaccions que podien donar compte de l'avenç o el retrocés de les geleres. En el seu treball Arrhenius desenvolupà un model de balanç d'energia que considerava els efectes radiatius del diòxid de carboni i del vapor d'aigua a temperatura ambient i estudiava les respostes d'aquest model a canvis en les concentracions de CO_2 . El seu treball fou publicat l'any següent (Arrhenius, 1896a, b).

El model formulat i treballat per Arrhenius era força simple i feia estimacions sobre la reflexió de la radiació per la superfície terrestre i els núvols o les retroaccions produïdes per la coberta de neu que, tenint en compte el coneixement actual avui considerariem rudimentàries o, simplement, errònies. Arrhenius va concloure que les variacions del contingut de diòxid de carboni i de vapor d'aigua de l'atmosfera poden tenir una gran influència en el balanç de calor del sistema climàtic. Aquesta conclusió la va obtenir després de fer càlculs a mà realitzant entre 10.000 i 100.000 operacions (no hi havia aleshores suport mecànic al càlcul) en el que avui anomenariem diferents escenaris de contingut de diòxid de carboni de l'atmosfera (considerant que el CO_2 que hi havia aleshores era 1, ho va calcular per concentracions de CO_2 0,67; 1,5; 2,0; 2,5; i 3,0) Els càlculs els va fer per a les quatre estacions de l'any i discriminant per la latitud. Dels seus càlculs Arrhenius va concloure de forma general "... si la quantitat de carbònic augmenta en progressió geomètrica, la temperatura variarà en progressió aritmètica". També Arrhenius

obtingué que la variació de la temperatura serà més important com més gran sigui la quantitat de diòxid de carboni i quan més alta sigui la latitud i que serà més gran a l'hivern que a l'estiu. En general, Arrhenius va predir un ascens de la temperatura en doblar-se el contingut de CO_2 atmosfèric de 5 a 6 graus.

Sorprèn que les prediccions d'Arrhenius siguin tan semblants, des del punt de vista quantitatiu, als resultats actuals elaborats mitjançant sofisticats models de circulació general. En aquesta semblança, probablement, rau també la consideració general del físic suec com a iniciador de la temàtica del possible origen antròpic del canvi climàtic actual. És important assenyalar però, que Arrhenius amb el seu treball inicialment mirava cap al passat ja que pretenia cercar la causa de l'evolució dels cicles climàtics glacials del passat, amb el càlcul de la probabilitat de grans variacions en el contingut de diòxid de carboni en temps geològics relativament curts.

La perspectiva històrica permet emmarcar el treball d'Arrhenius amb la referència de la situació actual del coneixement sobre els temes de canvi climàtic. Una de les seves contribucions més importants fou elaborar un model quantificat, a partir de dades de les observacions, en contrast amb les anàlisis més freqüents, aleshores, de caire qualitatiu. La informació de què disposava Arrhenius no era, però, de molta qualitat. D'un costat, la idea que les erupcions volcàniques eren la principal font del carbònic atmosfèric era simplista i connectada amb el coneixement geològic de l'època. La informació espectroscòpica disponible aleshores era molt primitiva: no es disposava d'informació completa sobre l'absorció de la radiació infraroja, especialment en la banda amb longituds d'ona superiors a 9,5 micròmetres (1 micròmetre = 10^{-6} metres = 0,000001 m) molt important tant pel diòxid de carboni com pel vapor d'aigua, i la major part de dades es referien a mesures fetes a la pressió atmosfèrica, pressió que si bé es dona a la superfície terrestre no és la pressió que hi ha a les capes mitjanes i altes de la troposfera. La imprecisió de la informació espectroscòpica fou una de les principals crítiques que es varen formular sobre el treball d'Arrhenius en dos aspectes: per un costat l'efecte del vapor d'aigua, que és molt més abundant que el CO_2 , i que absorbeix tota la radiació infraroja en una banda espectral que segons les dades que es tenien aleshores coincidia amb una banda d'absorció del gas carbònic. Per tant, en doblar-se el contingut de diòxid de carboni, augmenta la capacitat d'absorbir radiació, però no l'absorció real (Aquesta crítica al treball d'Arrhenius apareixia a una prestigiosa publicació de la Societat Americana de Meteorologia: Brooks, 1951). D'altra banda, la



saturació: si una determinada quantitat de CO_2 absorbeix una quantitat de radiació, si doblem la quantitat del gas carbònic, necessàriament no es dobla la radiació absorbida ja que hi ha un moment en què tota la radiació que es pot absorbir ja s'ha absorbit.

Durant el començament del segle XX Arrhenius continuà treballant en la seva teoria del clima. Conscient de la fragilitat de les seves dades espectroscòpiques seguí discutint el cicle del carboni i l'absorció de la radiació d'ona curta i d'ona llarga arribant a bandes d'absorció força grans (Arrhenius, 1903). També va publicar els seus treballs de forma poc tècnica amb l'objectiu que arribessin a una àmplia audiència (Arrhenius, 1908) revisant el treball de Fourier, Tyndall i altres investigadors i on parlava de la teoria de l'hivernacle, referint-se a l'atmosfera.

Arrhenius utilitzava el seu model per assenyalar que la temperatura observada de la Terra és trenta graus superior a la que tindria tenint en compte consideracions simplement geomètriques (o el que és el mateix, una Terra sense atmosfera) i que, la causa d'aquesta diferència, rau en el paper de l'atmosfera, el que avui anomenem efecte d'hivernacle. També mostrà amb el seu model, que una atmosfera sense diòxid de carboni tindria una temperatura uns vint-i-un graus inferior. No només com a científic, sinó com a atent observador de l'esdevenidor de la societat del seu temps, Arrhenius se n'adonà del ràpid creixement de les emissions antròpiques de diòxid de carboni, a causa de les activitats industrials i manifestà que era probable que els avenços de la indústria i de la societat desenvolupada en general, conduïrien en el curs de pocs segles a una atmosfera més rica en CO_2 i, per tant, més càlida.

Els treballs d'Arrhenius, però també la seva visió des de la perspectiva d'un ciutadà d'un país situat al nord, amb un clima rigorós i fred, juntament amb una visió positivista del progrés el portaren a escriure: *“Mitjançant la influència d'un percentatge cada vegada més gran d'àcid carbònic a l'atmosfera, podem esperar fruit de períodes amb un clima més temperat i millor, especialment pel que fa a les regions més fredes de la Terra, la qual cosa significarà que la Terra produirà millors i més abundants collites que incidiran en benefici del gènere humà”* (Fleming, 1998). Heus aquí, doncs, la primera menció moderna sobre els impactes antròpics del canvi del clima.

La continuació, fins l'esclat de la recerca en clima

Malgrat l'atenció que l'article de l'Arrhenius va produir, pràcticament fins els anys 1950 l'atenció de la comunitat científica sobre les qüestions plantejades per les variacions del

clima no fou gaire gran. No era el mateix al carrer. A finals dels anys 30 tothom tenia la sensació que la temperatura augmentava. Els avis deien als joves que mai havien viscut una calor com aquella, que pràcticament no nevava i que pràcticament no hi havia hivern. Ningú es preocupava gaire pel fenomen. El món tenia altres temes per amoïnar-se i tothom estava convençut que el clima variava en cicles i que aquell augment de la temperatura n'era una mostra. Però, a més, sobre els resultats d'Arrhenius es feien objeccions bastant demolidores. Per un costat, les bandes d'absorció del CO_2 es veien coincidents amb les del vapor d'aigua, gas aquest molt més efectiu en l'absorció de la radiació terrestre i per l'altra, la saturació de les bandes feia que si creixia el CO_2 com que s'havia absorbit ja tota l'energia, l'energia absorbida no augmentava. No obstant això, l'objecció més forta es basava en la tradició: com podia ésser que una acció humana trenqués l'equilibri geològic que perdurava des de la formació del planeta? En aquest període només un punt de discrepància quan un enginyer, Stewart Callendar el 1938 publica que el CO_2 atmosfèric ha crescut un 10% des de l'any 1890.

El paper dels oceans, però, sempre ha estat polèmic. També quan Callendar publicà els seus resultats, una certa dosi d'incredulitat es donà entre la comunitat científica. La idea dominant era que si l'oceà conté 50 vegades més carboni que l'atmosfera, l'augment del CO_2 és un esdeveniment temporal de forma que es restableixen les concentracions habituals en poc temps i que, per tant, el clima del passat servia perfectament per predir el clima del futur.

La recerca propiciada per la indústria militar produí un esclat d'observacions sobre les propietats espectroscòpiques dels gasos. Es va veure que les línies d'absorció més importants del diòxid de carboni no se superposen amb les del vapor d'aigua, especialment a les capes altes de l'atmosfera. Poc després, a mitjan dels anys 1950 un físic teòric, Gilbert Plass calculava i mostrava, que quant més CO_2 hi hagués a l'atmosfera més radiació s'absorbiria i, per tant augmentava l'efecte d'hivernacle. Però, realment això es donava, és a dir, el CO_2 a l'atmosfera augmentava la seva concentració?

La resposta no era fàcil de donar, ja que el CO_2 no es mesurava de forma sistemàtica i regular. Tampoc se sabia si aquest enorme reservori que és el mar podia anar regulant de forma contínua el diòxid de carboni atmosfèric. Aquest problema fou estudiat i resolt per dos científics americans Hans Suess i Roger Revelle (vegeu Weart, 2003). El primer, Hans Suess, tenia experiència en la datació mitjançant l'isòtop de carboni 14 i la utilitzà per mostrar que a l'atmosfera hi ha diòxid de car-



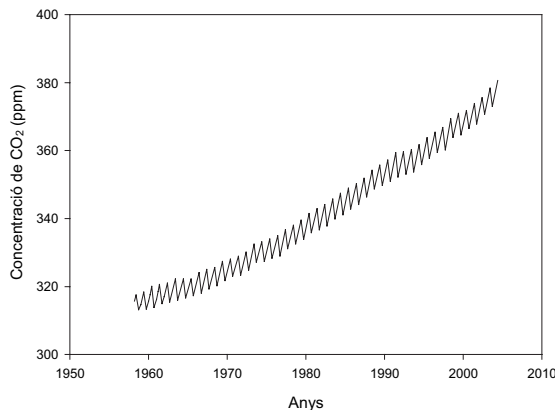


Figura 2. Concentracions del CO₂ atmosfèric a Mauna Loa, Hawaii. Font: Elaboració pròpia a partir de les dades obtingudes per cortesia de: C.D. Keeling i T.P. Whorf, Carbon Dioxide Research Group, Scripps Institution of Oceanography, Universitat de Califòrnia.

boni procedent d'emissions antròpiques. Si el CO₂ present a l'atmosfera procedia, en part, de la crema dels combustibles fòssils contenia una proporció inferior de carboni 14 que de carboni 12 comparat amb el carboni procedent de les emissions biogèniques. I així va resultar.

D'altra banda Roger Revelle, oceanògraf, es dedicà a estudiar l'absorció de gas carbònic per l'oceà. La qüestió no és senzilla ja que comporta conèixer bé la complicada física i química de l'absorció i depèn de dos processos diferenciats: l'absorció del gas a la superfície i la mescla de la capa superficial amb les capes profundes dels oceans. Finalment es va concloure que la capacitat de l'oceà d'absorbir el gas carbònic era limitada, molt inferior a la que s'havia calculat fins aleshores i que, a més, una molècula de CO₂ en mitjana roman a l'atmosfera uns deu anys.

Per tant, després d'aquestes conclusions es podia admetre teòricament que el diòxid de carboni atmosfèric augmentava i que aquest augment es deu a les activitats humanes, però, això s'ha mesurat?

La resposta és afirmativa, però no des de sempre sinó que des de fa molt poc. El registre instrumental de la concentració atmosfèrica de CO₂ es té des de l'any 1958, quan per insistència d'un aleshores, jove geoquímic Charles Keeling, i gràcies a la injecció de diners que va suposar la celebració de l'Any Geofísic Internacional, es va instal·lar un costós i precís instrument que mesurava la concentració del diòxid de carboni atmosfèric a l'observatori situat a la muntanya de Mauna Loa a Hawaii.

A la figura 2 poden veure aquesta concentració i la seva evolució des de l'any d'instal·lació de l'instrument. L'inexorable creixement, modulad per l'evolució estacional

de la biosfera, mostra com augmenta de forma constant i regular la concentració de CO₂ a l'atmosfera.

Poc després de la seva instal·lació allò que ara veiem clarament, ja s'intuïa i produí que molts científics gressin el cap i miressin amb curiositat i expectació un escenari atmosfèric canviant que pot fer variar el funcionament ambiental del món. El que no sabem encara és quant i com i per això, des d'aleshores, hi treballa tanta gent.

Bibliografia

- ANGLADA, M. A. (1996) *Relats de mitologia. Els déus*. Edicions Destino, Barcelona.
- ARRHENIUS, S. (1896a); "Über den Einfluss des atmosphärischen Kohlensäuregehalts auf die Temperatur der Erdoberfläche" *Bihang* 22: 102,
- ARRHENIUS, S. (1886b) On the influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground. *Philosophical Magazine*, 41: 237-276,
- ARRHENIUS, S. (1903) *Lehrbuch der kosmischen Physik*. S. Hirzel, Leipzig.
- ARRHENIUS, S. (1908) *Worlds in the Making: The Evolution of the Universe*. Harper and brothers, New York.
- BARD, E. (2004) Greenhouse effect and ice ages: historical perspective. *Comptes Rendus Geoscience*, 336: 603-638
- BROOKS C. E. P. (1951) In: T. F. Malone (ed.), "Compendium of Meteorology", American Meteorological Society, p. 1004,
- EBELMEN, J. J. (1845) Sur les produits de la décomposition des espèces minérales de la famille des silicates. *Ann. Mines* 7: 3-66.
- FLEMING J. R. (1998) *Historical Perspectives on Climate Change*. Oxford University Press, Oxford.
- FOURIER, J.-B. J. (1822) *Discours préliminaire de la théorie analytique de la chaleur*", F. Didot, Paris.
- FOURIER, J.-B. J. (1824) "Remarques générales sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires" *Annales de Chimie et de Physique*, 27: 136-167,
- TERRADAS, J. (2006) *Biografia del món*. Columna edicions, Barcelona.
- TYNDALL, J. (1861) On the absorption and radiation of heat by gases and vapour, and on the physical connection of radiation, absorption and conduction. *Philosophical Magazine*, 22: 167-194; 273-285,
- WEART S. R. (2003) *The discovery of global warming*. Harvard University Press, Cambridge.
- WEBSTER, N. (1810) On the Supposed Change in the Temperature of Winter. *Memoirs of the Conn. Academy of Arts and Sciences*, 1

