

# Entre el XIX i el XXI: la ciència atmosfèrica al segle XX<sup>1</sup>

SERGIO ALONSO OROZA

Universitat de les Illes Balears

IMEDEA, UIB-CSIC

MANUEL PUIGCERVER ZANÓN

Acadèmia de Ciències i Arts de Barcelona

## 1. Introducció

El segle XX ha significat una fita, potser irrepètible, en l'avanç de la ciència i de la tècnica. Amb tota seguretat serà irrepètible per a aquells que, començant el segle XXI, estem escrivint o llegint aquestes reflexions, perquè no ho podrem tornar a fer en cap altre segle. Si fem una ullada a algun dels avanços que s'han produït, ens adonarem fins a quin punt estan introduïts en el nostre quefer diari i el difícil que ens resultaria avui en dia viure sense ells: sense semiconductors ni ordinadors, sense dominar les ones electromagnètiques, sense avions ni satèl·lits de comunicacions o d'observació de la Terra, sense *xips*, sense plàstics, i un llarg etcètera. Resulta evident que totes aquestes coses han representat una gran millora en l'evolució de la humanitat cap al progrés; però no és menys cert que també ho ha representat per al propi avanç del coneixement en general i per a totes les ciències en particular. Normalment, els grans descobriments són conseqüència, de vegades fortuïta, del lent però continu avanç del coneixement; no obstant, quan el descobriment s'ha produït, el propi coneixement l'aprofita en una espècie d'efecte multiplicador. Altres vegades, tanmateix, l'avanç del coneixement en una certa direcció no s'ha produït, o s'han donat estrepitosos fracassos, perquè no es disposava de la tecnologia adequada en el moment oportú. Tot això, com a cas particular, és el que ha ocorregut amb l'esdevenir de la meteorologia, a la qual estan dedicades les pàgines següents.

Pràcticament, el progrés de la meteorologia, fins a aconseguir el seu nivell actual, s'ha produït al segle XX, i ha estat conseqüència en gran manera, encara que no sols, dels grans descobriments que hem pogut gaudir en aqueix segle. No obstant això, l'existència dels serveis meteorològics i la influència que la física ha exercit sobre la ciència atmosfèrica, han estat també decisius. Durant el segle XIX, els països del món més importants de l'època havien ja establert certes estructures, fonamentalment informatives, precursors dels serveis meteorològics actuals. S'ha discutit prou sobre les raons del seu naixement, fent-les recaure, moltes vegades, en les destrosses que una terrible tempesta en el mar Negre va produir a les flotes de França i Gran Bretanya durant la guerra de

---

<sup>1</sup> Traducció del castellà de María Dolores Burdeus.

Crimea, l'any 1854. És veritat que França, Gran Bretanya i Holanda van iniciar justament aquell any el procés per establir serveis d'informació meteorològica, però no és menys cert també que Prússia ho havia fet almenys un lustre abans, i que als Estats Units hi havia diferents organismes privats que exercien una funció equivalent. Segurament va ser molt més important la influència que van poder exercir científics de gran renom, com Helmholtz, Henry, Hertz, Kelvin o Maxwell, interessats per alguns problemes atmosfèrics, o el descobriment del telègraf, fonamental per a la transmissió dels avisos de mal temps. No s'ha d'oblidar tampoc l'impacte econòmic, o el perill per a la vida de les persones, que podien produir les situacions de mal temps en la marina mercant o en les flotes pesqueres de l'època. El mateix es pot dir respecte a l'aviació en gran part del segle passat.

No resulta fàcil resumir, en unes poques pàgines, l'esdevenir de la meteorologia durant una mica més d'un segle. D'altra banda, també és difícil fer-ho d'una forma lineal, cronològica, perquè no és així com la ciència avança, sinó a través d'una espècie de malla que es teixeix lateralment per anar guanyant llargària, en la qual el treball en paral·lel i entrellaçat permet, en un moment donat, el llançament cap a endavant per guanyar el futur.

També ocorre que, en el riu de la ignorància, sobreïxen normalment roques que permeten passar d'una vora a l'altra. En unes poques d'elles (Vilhelm Bjerknes, Carl-Gustaf Rossby, Hans Ertel i Edward Lorenz) està basat el relat que segueix. No obstant, es podria haver fet alguna altra selecció, no menys brillant, amb Richardson, autor de la primera *simulació* numèrica del temps uns 35 anys abans de la realitzada amb l'ENIAC, amb Charney i Hoskins, principi i fi de la dinàmica quasigeostròfica, o amb els tres guanyadors del Nobel per la seua contribució a l'estudi de la química atmosfèrica de l'ozó: Molina, Crutzen i Rowland. Possiblement més d'un lector pense en alguna altra possibilitat, amb tota seguretat tan bona o millor que la que ací es considera.

L'estructura d'aquest treball és la següent: en el proper apartat passarem revista als primers intents d'abandonar la simple observació dels fenòmens meteorològics, previs a l'establiment per Bjerknes de l'Escola de Bergen (Noruega), a la qual es dedica la tercera secció. En la secció 4 descriurem la tasca de Rossby i Ertel durant els difícils anys de la II Guerra Mundial i la importància que després va adquirir l'Escola de Chicago. La previsibilitat de l'atmosfera serà tractada en la secció 5, tot passant dels treballs de Lorenz a la idea del caos. En la secció 6 s'introdueix un dels problemes globals més importants que afectaran a la humanitat en el present segle: l'anomenat canvi climàtic. La secció 7 aborda la simulació del clima i la previsió numèrica del temps, amb el seu origen comú i desenvolupament diferenciat. Finalment, en la secció 8, s'enuncien alguns problemes que han quedat pendents al segle xx i que, amb tota seguretat, aniran esmicolant-se al segle XXI.

## 2. De Le Verrier a Bjerknæs

Urbain Jean-Joseph Le Verrier va ser un astrònom francès de renom. Havia rebut en 1845 d'Arago,<sup>2</sup> Director de l'Observatori Imperial de París, l'encàrrec d'estudiar les pertorbacions de l'òrbita d'Urà. Le Verrier va arribar a la conclusió que la causa pertorbadora havia de ser un planeta desconegut situat més enllà de l'òrbita d'Urà, els paràmetres orbitals del qual va arribar a determinar. L'astrònom berlinès Johannes G. Galle, informat per Le Verrier de l'existència i posició del nou planeta, el va descobrir a la primera observació. Amb el pas del temps, Le Verrier va succeir Arago en la direcció de l'Observatori Imperial.

Després del desastre de Crimea, el ministre de la Guerra de Napoleó III va encarregar a Le Verrier, a causa del seu reconegut prestigi internacional, l'estudi del que havia ocorregut amb l'anteriorment esmentada tempesta. Al poc de temps, Le Verrier va comunicar a l'Acadèmia de Ciències de París que el temporal s'haguera pogut anunciar un dia abans d'haver-se produït. Va arribar a aquesta conclusió després de determinar la *trajectòria* de la pertorbació meteorològica com si es tractara d'un planeta. Posteriorment, va proposar a l'emperador la posada en marxa d'un sistema d'avisos del mal temps, que va ser aprovat.

En aquell moment, la ciència, i la física en particular, estava dominada per les idees deterministes, la qual cosa va fer que no resultara estrany el comunicat de Le Verrier. Cal dir no obstant que, en realitat, les coses són una mica més complicades. L'atmosfera és un fluid, i les borrasques en absolut poden ser considerades com a partícules fluides, en la terminologia lagrangiana, que de fet va ser el que Le Verrier va suposar per arribar als seus resultats. No obstant això, en aquella època s'havien ja aconseguit alguns èxits parcials en l'estudi de les situacions de mal temps emprant mètodes locals, prou semblants als lagrangians, però de curt abast (per exemple, Dové a Prússia).

L'altre punt de vista en la descripció del moviment dels fluids és l'anomenat eulerià. No parteix, com en el cas lagrangia, del concepte de partícula fluida, sinó que està basat en la determinació dels canvis temporals de les propietats del fluid en un gran nombre de punts fixos de l'espai. En principi aquest segon mètode sembla més adaptat als estudis meteorològics, a causa de la localització dels observatoris en punts geogràfics fixos. Evidentment, és necessari un bon sistema de comunicacions, com de fet ho va ser en el seu moment el telègraf, per tal d'enviar tota la informació i poder confeccionar un mapa del temps (conegut com a mapa sinòptic).<sup>3</sup>

<sup>2</sup> Durant la Guerra de la Independència, Arago es trobava realitzant una campanya d'observació de la polarització de la llum del cel en Sa Mola d'Esclop, una de les muntanyes de la Serra de Tramuntana de Mallorca. Els habitants de la zona sabien que en una cabanya —encara avui en dia porta el seu nom: Caseta d'Aragó— vivia un francès. En un moment d'exaltació, van decidir anar a la "caça del gabatxo", però Arago, alertat per uns amics, va poder fugir muntanya avall, encara que es va creuar amb els que el buscaven. El seu origen catalanofrancès li va salvar la vida en poder intercanviar amb ells unes paraules en català. Si no haguera estat així, part d'aquesta història podria haver pres altres direccions.

<sup>3</sup> Cap als anys 20 del segle XIX, Brandes, professor de la Universitat de Breslau, havia proposat incorporar en un mapa informació simultània d'observatoris allunyats, però va ser en la segona meitat d'aquell segle XIX quan es va començar a aplicar amb èxit, per exemple, per Fitz Roy (que havia estat comandant del *Beagle*, vaixell que va portar a Darwin a donar la volta al món), que va establir un servei d'observacions meteorològiques a Gran Bretanya, per Loomis als Estats Units i per Liais a França, que va ser qui va portar a terme la seua aplicació per a Le Verrier, en el cas comentat anteriorment.

Vilhelm Firman Bjerknes va nèixer el 1862, pocs anys abans de morir Le Verrier. En l'època del seu naixement es desenvolupaven lluites estèrils entre els defensors del mètode local i del sinòptic. La balança es va decantar per aquest últim, en part com a conseqüència d'actituds personalistes, poc obertes als descobriments que s'anaven produint, per part de Dové, el major exponent de l'escola prussiana. Vilhelm Bjerknes va iniciar la seua vida científica fortament influenciat per son pare, Carl Anton, catedràtic de la Universitat Reial escandinava de Kristiania (Oslo), que tractava de trobar similituds hidrodinàmiques per a l'electromagnetisme i de provar la necessitat de l'existència de l'èter, tot seguint les idees d'Hertz. Vilhelm va obtenir una beca per estudiar a París de 1889 a 1891 amb Poincaré, Hermite, Picard i Mascart. Allí es va trobar que es defensaven teories contraposades a les que seguia son pare, i va poder viure en directe els atacs a les teories d'Hertz. Amb la idea d'ajudar a son pare, va escriure a Hertz per tal d'anar a treballar amb ell a Bonn. Quan el va visitar el 1890, va sofrir una gran decepció en veure que treballava sol en un laboratori no molt ben dotat —just acabava d'arribar a la Universitat de Bonn— i, a pesar dels desitjos d'Hertz perquè treballara amb ell, va tornar a Noruega, on va obtenir el doctorat el 1898, a partir dels seus treballs d'investigació sobre ones hertzianes. Les seues idees van quedar plasmades en la presentació pública d'una lliçó sobre l'aplicació dels principis de la mecànica en física. Malgrat la seua tornada a Noruega, sempre va mantenir la seua relació amb Hertz.

Podem considerar que V. Bjerknes comença a sorgir com a figura per a la meteorologia en adonar-se de la inadequació dels teoremes de vortexitat i circulació d'Helmholtz i Kelvin quan s'apliquen a fluids no barotrops. En realitat, aqueixos teoremes només són vàlids quan la densitat és constant o, en cas de no ser així, depèn només de la pressió (condició de barotropia). En caure en el compte d'aquest fet, va poder enunciar un nou teorema de la circulació i va introduir alguns conceptes emprats de l'electromagnetisme que han arribat fins als nostres dies. Es va adonar, a més, que es podia aplicar a l'atmosfera i a l'oceà, com a exemples reals de fluids baroclins (no barotrops). Això és característic de V. Bjerknes, ja que, tot i ser bàsicament un teòric, mai no va perdre de vista les aplicacions. El seu teorema, publicat el 1898, va representar el primer contacte amb la meteorologia, però de moment només va ser això, un primer contacte. Ell no ho sabia, però estava començant a establir les bases del que avui es coneix com a dinàmica dels fluids geofísics, en establir un tractament comú per a l'atmosfera i els oceans.

El predomini de la concepció electromagnètica sobre la mecànica, junt amb alguns fracassos professionals, van provocar que desistira en la seua idea d'imposar el model mecanicista de la física en tot el món. El procés no va ser brusc, sinó gradual. En primer lloc, el gran interès que mostraven els seus col·legues de Suècia pel seu teorema de la circulació el va fer mirar seriosament cap a la meteorologia. A mesura que transcorria el temps, el seu interès per les aplicacions geofísiques del seu teorema anava creixent, tot i que encara ho simultaniejava amb els seus treballs sobre la concepció mecànica de la física. D'altra banda, no estava molt content amb l'actitud de molts dels seus col·legues físics, que el menyspreaven per seguir encabotat a defensar Hertz quan s'imposaven les idees de Maxwell.

L'any 1906 va donar el salt definitiu. L'any anterior havia aconseguit de la Institució Carnegie, acabada de crear, fons per al seu projecte de la predicció exacta del temps a

partir de les lleis de la física (aquesta exactitud va ser posada en dubte a partir dels treballs de Lorenz, com després veurem). El seu punt de vista, que havia estat publicat dos anys abans, va cridar l'atenció dels científics nord-americans, que el van invitar a exposar les seues idees a la Universitat de Columbia. La conferència pronunciada representava el programa de Vilhelm Bjerknes per a la creació d'una meteorologia dinàmica. Allí ho va resumir amb aquestes paraules:

Tot problema atmosfèric es pot reduir a establir la posició i moviment de totes les partícules d'aire implicades i predir el seu futur estat, posició i moviment en un instant donat mitjançant les lleis de la física: un problema que, en principi, ha de ser susceptible de solució. Aquesta ha de comprendre tres passos: 1) realitzar el millor diagnòstic possible dels estats atmosfèrics; 2) trobar la posició futura de totes les partícules, i 3) determinar els seus estats futurs en les noves posicions.

El resultat va ser la concessió d'una ajuda de la Institució Carnegie que va durar 36 anys. Gràcies a ella, Bjerknes —una de les qualitats del qual era la detecció de talents— va poder col·locar a tres brillants joves (Sandström, Hesselberg i Devik, posteriorment substituït per Sverdrup), amb els quals va publicar els dos primers volums del seu *Dynamic Meteorology and Hydrography*. Prompte va veure, no obstant, que un físic poc conegut d'un país menut no podria efectuar les reformes pràctiques que requerien els serveis meteorològics per prosseguir el tractament físicament fundat que ell projectava. Per això va acceptar la càtedra i la direcció d'un Institut de Geofísica (en realitat, de Meteorologia) que la Universitat de Leipzig li va oferir el 1912.

El van acompanyar Hesselberg i Sverdrup, als qual es van unir Solberg i el seu fill Jacob ("Jack") Bjerknes, ambdós d'uns 20 anys. Els començaments van ser prometedors: diversos joves es van integrar en l'Institut, entre els quals destacava Petzold; es van assajar noves tècniques d'anàlisi, particularment el traçat de línies de corrent, que va posar de manifest l'existència de certes línies de convergència com a característica habitual en els mapes del temps. V. Bjerknes i Petzold havien especulat sobre la seua possible naturalesa física; J. Bjerknes i Solberg van mostrar la seua aparent relació amb àrees de pluja.

### 3. L'Escola de Bergen, o la importància de la física

Les condicions de vida a l'Alemanya de 1917 eren penoses; la salut de V. Bjerknes es va ressentir, els seus deixebles alemanys estaven en files i Petzold havia caigut a Verdún. V. Bjerknes va ser cridat al seu país per fundar un Institut Geofísic a Bergen quan Noruega estava virtualment aïllada, sense poder importar aliments i quasi incomunicada.

Però els Bjerknes van mostrar una altra vegada el seu sentit pràctic. El 1918, l'agricultura i la importantíssima pesca de Noruega necessitaven vitalment un servei eficaç de predicció del temps; d'altra banda, ells desitjaven prosseguir els seus estudis sobre les línies de convergència. Van aconseguir decuplicar la densitat d'estacions d'observació al sud de Noruega i van introduir nous elements en les observacions: núvols, visibilitat i precipitació. Els observadors, reclutats entre agricultors i marins o pescadors retirats (gent acostumada a observar el temps) i ensinistrats personalment pels Bjerknes, sentien

l'orgull del bon professional —el treball ben fet— que garantia la qualitat de les observacions. A més a més, V. Bjerknes va aconseguir, amb Hesselberg, aleshores director de l'Institut Meteorològic Noruec, establir dues noves oficines de predicció: la de Bergen, dirigida per Jack Bjerknes, i la d'Oslo, per Solberg. El prestigi dels Bjerknes i la seua tasca de fitxatge de talents van atraure a Bergen diversos joves, alguns dels quals han deixat el seu nom en la història de la meteorologia: Rosseland el 1918, Bergeron, Bjorkdal i Rossby el 1919; poc més tard, Palmén i Petterssen.

Vilhelm Bjerknes discutia diàriament les seues idees amb els seus deixebles, però els deixava total llibertat per assajar innovacions. D'altra banda, aquells joves de sòlida formació física i matemàtica, sabien poc de la meteorologia llavors clàssica i no res dels mètodes d'anàlisi en ús a l'època. Així doncs, podien trencar amb idees preconcebudes si discrepaven dels fets, i aquests es detectaven amb certa facilitat gràcies a la densitat de la xarxa noruega d'observacions.

Els resultats no van tardar a arribar. El 1919, Jack Bjerknes va publicar una monografia que pot qualificar-se d'històrica. Per primera vegada descriu els fronts fred i càlid (encara anomenats línies de convergència) i dona una explicació física tridimensional dels moviments de l'aire en la depressió, justificant els hidrometeors (núvols i precipitació) característics de cada tipus de front. L'energia de la depressió s'adcrivia a la transformació d'energia potencial de masses d'aire juxtaposades. Part de tot això havia estat apuntat per altres autors feia alguns anys. El geni de Bjerknes consisteix a haver reunit porcions disperses de veritat tot integrant-les en un quadre tridimensional coherent i recolzat en bones observacions.

Tanmateix, el model encara era estàtic. La clau de l'evolució de les depressions va arribar quasi simultàniament per les vies experimental i teòrica. Bergeron es va adonar, cap a 1919, que el sector càlid es va estretint amb el temps i arriba a perdre contacte amb el sòl, procés anomenat oclusió. J. Bjerknes i Solberg, en una altra monografia històrica, van introduir la idea que les depressions s'originen com a ondulacions en la superfície de separació de les dues masses d'aire polar i tropical, ara ja anomenat front polar, prenent prestada la terminologia bèl·lica en voga. Amb això es podia seguir el cicle de vida de les depressions, des del seu origen com a ones de petita amplitud en el front polar, passant a depressió jove amb ona d'amplitud creixent i ulterior oclusió, fins a la seua desaparició com vòrtex immers en l'aire fred. De pas, Bergeron va introduir la seua teoria de la precipitació, que requereix la coexistència de cristalls de gel i gotes d'aigua en l'interior del núvol; per a núvols freds segueix sent bàsicament vàlida en l'actualitat.

Solberg, no obstant, desitjava establir els fonaments físicomatemàtics de la teoria ondulatòria de les depressions. Per això va encetar, amb V. Bjerknes, una investigació per mostrar que en una superfície de discontinuïtat inclinada, com el front polar, es podien formar ones capaces de creixement. El problema era complicat, però es va poder demostrar que, amb certes restriccions, tal creixement era possible. En aquests treballs està contingut el fonamental descobriment de la inestabilitat baroclínica, encara que s'acostuma a atribuir el seu plantejament a Eady, després d'un treball publicat l'any 1949.

L'Escola de Bergen havia aconseguit establir una sòlida base teòrica del nou model de depressió, així com elaborar un mètode d'anàlisi que, a més de proporcionar una descripció lògica de l'estat del temps, contenia els elements necessaris per predir la seua

evolució. El cos de doctrina de l'Escola està contingut en la monumental *Physikalische Hydrodynamik*. En uns pocs anys s'havia avançat més que en tota la història de la predicció del temps. I més encara: molts descobriments moderns estaven ja continguts, explícitament o intuïts, en les seues idees.

Gran part del mèrit és degut a V. Bjerknes: a la seua excepcional claredat d'idees, a la seua facultat d'interpretar físicament resultats matemàtics, al seu encert en l'elecció de col·laboradors i a l'esperit que va saber inspirar al seu grup junt amb els principis que van informar la filosofia de l'Escola de Bergen.

En llegir, fins i tot ara, alguns treballs del grup, la primera impressió és d'un indiscutible sentit comú. La segona és d'admiració davant d'aqueixa impressió de senzillesa, tot i tractant qüestions complicades (gens sorprenent si tenim en compte quines persones formaven el grup). Un altre encert és la publicació de tots els treballs importants en alemany (llavors idioma científic per excel·lència) o en anglès, la qual cosa assegurava la seua difusió.

Aquesta difusió, no obstant, no va ser fàcil ni ràpida. La doctrina es va exposar per primera vegada davant d'una audiència internacional influent en una conferència de directors de serveis meteorològics celebrada a Bergen el 1921, però encara haurien de transcórrer quinze anys abans de ser generalment acceptada.

Vist amb la perspectiva que dona el temps transcorregut, val a dir que ha estat possible arribar on avui estem gràcies, en gran part, a l'infatigable esforç i a la claredat d'idees d'un petit grup d'homes que, en el primer quart del segle passat, treballava en una petita oficina d'una petita ciutat d'un petit país: l'Escola Noruega de Meteorologia.

#### 4. Rossby i Ertel separats per una guerra

Gran part del desenvolupament inicial de la física ha estat marcat per la recerca de propietats invariants, que romandrien constants mentre es produïra qualsevol tipus d'evolució (algunes d'elles van ser la massa, l'energia, la quantitat de moviment, etc.). La meteorologia no va escapar d'aquesta tendència. Han estat deduïdes un bon nombre de temperatures que es mantenen quasi invariants en alguns processos termodinàmics possibles de l'atmosfera, la qual cosa permet usar-les amb cert èxit per identificar masses d'aire. Quan es té en compte que les evolucions termodinàmiques es donen en l'atmosfera al mateix temps que aquesta es mou, la recerca de propietats invariants es complica. Els teoremes de circulació i vortexitat de Kelvin, Bjerknes i Helmholtz condueixen a propietats invariants, però en condicions tan restrictives que disten molt de ser aplicables als moviments reals de la nostra atmosfera. Rossby i Ertel van tractar, sense saber-ho, simultàniament aquest problema. Per desgràcia per a ells, i possiblement per a l'esdevenir de la meteorologia, açò ocorria durant la II Guerra Mundial. Rossby treballava, des de 1926, als Estats Units i Ertel a Alemanya.

Rossby, deixeble de Bjerknes, estava estudiant el moviment de l'atmosfera tot usant la pressió com a coordenada generalitzada, i va trobar una lligadura termohidrodinàmica per a l'esmentat moviment. En l'expressió apareixia la vortexitat; per aqueixa raó va batejar la propietat implicada amb el nom de vortexitat potencial en un treball publicat el 1940. Ertel, per la seua banda, tractava de generalitzar els teoremes de circulació i

vortexitat. Per això no va prendre en consideració condicions restrictives, però va introduir la conservació de la massa en el moviment dels remolins i una propietat termodinàmica arbitrària que hauria de romandre invariant durant el moviment. Açò va simplificar enormement les equacions i va permetre a Ertel d'enunciar un important teorema termohidrodinàmic. Els seus treballs, molt més generals que el de Rossby (que ell desconeixia), es van publicar en alemany dos anys després i van romandre quasi desconeguts durant molts anys. Francisco Morán, que fóra catedràtic de física de l'aire de la Universitat Complutense, va contribuir a l'establiment del teorema. El propi Ertel ho va reconèixer en un dels seus articles, segons va indicar Garmendia en el cinquantenari del descobriment, afegint a més que la guerra, la nacionalitat d'Ertel i la llengua emprada per comunicar-ho van ser les causes de l'"oblit" d'aquest nou teorema hidrodinàmic del remolí, com el propi autor el va batejar.

Amb el pas del temps s'ha reconegut el gran valor del teorema d'Ertel, i s'ha provat que la lligadura imposada per la vortexitat potencial de Rossby és, en realitat, un cas particular del teorema d'Ertel. A més a més, es pot enunciar el nou teorema del remolí per a una vortexitat potencial generalitzada, la qual cosa unifica les dues deduccions. Avui en dia s'acostuma a parlar de la vortexitat potencial d'Ertel-Rossby, fent honor als dos investigadors.

No es pot abandonar aquesta part de la història sense indicar que Rossby va ser als Estats Units l'inspirador i líder d'una nova escola, a la Universitat de Chicago, abans de tornar a Suècia. Gran part de la meteorologia actual es va iniciar allí, tot projectant la influència de l'Escola de Bergen. Tanmateix, no es pot ocultar que alguns avanços tecnològics (radiosonda, teletip, radar meteorològic, facsímil, satèl·lits de comunicacions, ordinadors i satèl·lits meteorològics) han estat imprescindibles per arribar a la situació en què ens trobem avui.

Reprement el fil de la vortexitat potencial, la generalització del càlcul numèric mitjançant ordinador ha vingut a donar-li gran importància. De fet, no es pot dir que no l'haguera tinguda, però sí que és cert que el seu ús estava prou limitat a aspectes purament teòrics i conceptuals. No obstant, la possibilitat de realitzar càlculs inviàbles amb anterioritat, junt amb l'establiment de la teoria quasigeostròfica —una molt bona aproximació al moviment atmosfèric—, van fer canviar considerablement el panorama. En la teoria quasigeostròfica, la distribució tridimensional del geopotencial (energia potencial gravitatòria terrestre per unitat de massa) permet determinar les variables termohidrodinàmiques de l'atmosfera. La pròpia vortexitat potencial admet una versió simplificada a partir de la qual, coneguda aquesta i resolent una equació, es pot obtenir la distribució de geopotencial. Després, a partir del geopotencial, es dedueixen les variables atmosfèriques. Dit d'una altra manera, la distribució espacial de la vortexitat potencial permet interpretar quasigeostròficament la dinàmica de l'atmosfera.

El plantejament i resolució d'aqueix problema en l'aproximació quasigeostròfica no és massa difícil. El repte, però, es trobava en el cas general. Si no es considera l'esmentada aproximació, és possible la mateixa reflexió? Poden interpretar-se els fenòmens dinàmics de l'atmosfera només amb la vortexitat potencial? La resposta, amb certs matisos, és afirmativa. A partir d'aquí, d'una banda, s'ha après a interpretar les distribucions de vortexitat potencial (s'ha encunyat el terme *PV thinking* a partir dels treballs d'Hoskins)



i, d'una altra, es poden atribuir quantitativament camps termohidrodinàmics (vents, pressió, temperatura) a les distribucions de vortexitat potencial tot resolent numèricament equacions més complicades que les quasigeostròfiques per mitjà d'ordinador.

Curiosament, en la dècada passada s'ha tancat simbòlicament una corba en la història. Bjerknes pretenia una interpretació mecànica de l'electromagnetisme; de fet, el seu teorema de la circulació va sorgir d'aqueixa concepció. Ara s'ha vist que la vortexitat potencial compleix unes equacions formalment iguals a les de l'electrostàtica. Gràcies a la interpretació dels camps elèctric i de desplaçament i de la polarització dels dielèctrics, Thorpe i Bishop han pogut establir un símil elèctric per a la vortexitat potencial.

## 5. Lorenz i la ubiqüitat del caos

Edward Lorenz és possiblement el meteoròleg més conegut fora dels àmbits de l'especialitat. La seua contribució al coneixement de la circulació general de l'atmosfera és, inicialment, el treball que més va atraure el reconeixement dels seus col·legues. Tanmateix, la troballa del seu article sobre el comportament no periòdic del flux en la convecció de Rayleigh-Benard per part dels investigadors en física teòrica, és el que va produir una vertadera explosió del nombre de citacions dels seus treballs. Havia cridat l'atenció de Lorenz el problema d'un col·lega seu, que treballava en fenòmens de convecció en laboratori, consistent en el comportament "anòmal" d'algunes variables característiques del fluid utilitzat. Lorenz es va proposar ajudar-lo simplificant convenientment les equacions de Navier-Stokes mitjançant un mètode usat en dinàmica atmosfèrica.<sup>4</sup> El sistema d'equacions resultant (identificat moltes vegades com "el problema de Lorenz") condueix al celeberrim resultat que la solució, que depèn de diversos paràmetres, presenta sensibilitat a les condicions inicials. Avui en dia es diu que això és un reflex del comportament caòtic.

Des del punt de vista de la meteorologia, aquesta troballa és de gran transcendència. La sensibilitat a les condicions inicials significa que, partint de condicions molt pròximes, les equacions proporcionen valors que es van separant més i més a mesura que transcorre el temps, de tal manera que arriba a ser impossible discernir que hagen evolucionat des de valors molt semblants. Si l'atmosfera es comporta d'aqueixa manera, com realment succeeix, petites diferències en les variables meteorològiques poden donar lloc a situacions totalment diferents.<sup>5</sup> Tenint en compte que la predicció del temps (com es veurà més endavant) es realitza integrant temporalment models d'atmosfera a partir d'un estat inicial observat, petites diferències en l'estat inicial poden donar lloc a mapes previstos

<sup>4</sup> De fet, les equacions de govern són les mateixes, encara que puguin ser diferents els ordres de magnitud dels diferents termes. Per exemple, en les equacions del moviment horitzontal per a l'atmosfera i els oceans, la força bàrica és del mateix orde de magnitud que la força de Coriolis, la qual cosa dóna lloc a acceleracions, almenys, un orde de magnitud menors. Açò no ocorre en el laboratori, on la força de Coriolis pot ser menyspreada front a la força bàrica.

<sup>5</sup> De vegades s'atribueix a Lorenz el comentari que si una papallona voletejara al costat dels sensors d'una estació meteorològica, el petit canvi que originaria en els valors mesurats acabaria afectant el temps atmosfèric en tot el món; no obstant, no hem estat capaços de trobar en la literatura consultada el comentari anterior, que molts denominen *efecte papallona*.

diferents i tant més diferents com més temps transcórrega, la qual cosa crea un seriós problema. En el fons, el que s'està dient és que, com mai es tindrà la seguretat de l'exactitud de les condicions inicials, mai serà possible una predicció exacta del temps (cal recordar ací el plantejament de Bjercknes). De totes maneres, cal indicar que una discussió sobre la possibilitat o no de l'exactitud és en realitat estèril; el que importa és si la qualitat de la predicció permet que aquesta siga útil, encara que no siga exacta.

D'altra banda, el propi descobriment de Lorenz ha permès abordar la predicció del temps per un mètode molt enginyós. Com no es té la seguretat que l'estat inicial siga una reproducció prou precisa de la realitat de l'estat atmosfèric, es pot partir de diferents estats inicials plausibles i deduir els diferents estats previstos. Elegits convenientment aquells, els mapes del temps resultants es poden agrupar per analogia i establir una predicció estadística. Es parla de predicció per conjunts. Sense arribar exactament a aquesta conclusió, Lorenz va anticipar també de fet aquesta possibilitat, perquè en treballs posteriors va demostrar que per a l'atmosfera existien uns estats cap als quals tendien els estats reals, com si els atragueren. Per això es parla d'atractors.

Els treballs de Lorenz han representat un punt de partida per als nous estudis sobre el caos que s'han desenvolupat en les últimes dècades del segle xx. En realitat s'ha arribat a dir que el caos es troba per tot arreu. Molts dels fenòmens naturals o provocats per l'home el desenvolupen. Basta per a això que el comportament siga no lineal. Per exemple, quan existeix un llinar que, en superar-se per la causa que produeix un fenomen, s'arriba a desenvolupar un efecte desmesurat, o quan els efectes influeixen en les causes (es parla de retroalimentació o *feedback*). Les equacions que regeixen aquest tipus de processos depenen de diversos paràmetres, presenten sensibilitat a les condicions inicials, disposen d'uns atractors especials —denominats fractals— per a les solucions i poden presentar fenòmens anomenats de bifurcació (per a un fenomen concret pot observar-se un cert estat d'equilibri, però, si canvien les condicions, es podria donar una transició cap a un altre, o altres, estats molt diferents de l'observat). Altres característiques són la coexistència de diferents escales de grandàries i duracions, i el denominat caràcter complex (com a sinònim de difícil, complicat, i que necessita moltes variables per a ser descrit) dels fenòmens caòtics.

Aquest tipus de dinàmica no lineal s'ha estudiat, més enllà de la meteorologia i de la climatologia, en làsers, en dinàmica de poblacions o en els mercats financers i, moltes vegades, sense conèixer exactament l'origen meteorològic d'aquesta nova àrea d'investigació.<sup>6</sup> Hi ha qui considera que els treballs de Lorenz i posteriors sobre el caos han representat una autèntica revolució en l'avanç del coneixement humà, semblant a la que va antecedir al naixement de la mecànica quàntica.

## 6. El salt del temps al clima

Un dels temes que ha anat guanyant interès per part dels científics és el relatiu al clima del planeta. Paral·lelament, també els mitjans de comunicació, els polítics i, com a conseqüència, els ciutadans en general han anat prenent consciència d'un dels problemes

<sup>6</sup> Fora de la meteorologia s'acostuma a utilitzar el terme "sistemes dinàmics" per a aquesta nova disciplina.

ambientals d'importància amb què ens enfrontarem al llarg del segle XXI. És possible que es pugui considerar simplista però, des del punt de vista de l'avanç del coneixement, el fet que la predicció del temps en escala d'uns pocs dies fóra millorant va fer pensar als modelistes que, en repetir el procés al llarg de dies i dies, durant molts mesos i molts anys, es podria predir el clima. Aquesta possibilitat, en principi, pot no semblar desgavellada, perquè les condicions climàtiques es dedueixen, a partir de les observacions meteorològiques, estudiant el comportament estadístic de sèries llargues de variables ambientals. No obstant això, hi ha implícit un error: el clima es percep a través de l'atmosfera, però no el determina només l'atmosfera. El clima queda determinat pels fluxos d'energia, aigua i altres propietats entre les diferents parts del que s'ha anomenat el sistema climàtic, format per l'atmosfera, la hidrosfera, la litosfera, la criosfera i la biosfera. L'energia que manté tots els processos que determinen aquests fluxos prové quasi exclusivament del Sol. Les escales temporals implicades en els fluxos que s'estableixen entre els diferents subsistemes són molt variades i van des de les molt curtes (minuts o menys, per a la turbulència atmosfèrica, o dies per a les perturbacions sinòptiques) fins a les molt llargues (centenars de milers d'anys, en el cas de les eres geològiques). Açò introdueix condicions de gran complexitat en els fenòmens residents en el sistema climàtic i que caracteritzen el clima.

Conseqüentment, no n'hi ha prou amb conèixer la dinàmica atmosfèrica en l'escala d'uns pocs dies per a, repetint i repetint el procés, poder predir el clima. Cal tenir en compte les causes que determinen el clima i considerar condicions de contorn adequades per poder projectar les simulacions cap al futur (en el pròxim apartat es farà una descripció més detallada del problema de la simulació del temps i del clima).

L'origen, almenys en la seua major part, de l'interès que ha despertat el clima al final del segle XX s'ha d'atribuir a la constatació de la relació entre l'augment de temperatura mitjana del planeta que s'ha vingut observant des del segle XIX ( $0,6^{\circ}\text{C}$ ) i l'augment de la concentració del diòxid de carboni ( $\text{CO}_2$ ) en l'atmosfera. En conseqüència, si la seua concentració continuara augmentant, el planeta aniria evolucionant cap a un clima més i més càlid. Moltes vegades se sent dir, i es llegeix, que això és l'efecte hivernacle, però no és així. Convé deixar-ho clar, com també convé deixar clar l'origen de l'explicació del problema: acabant el segle XIX, Arrhenius va comunicar a la Royal Society l'efecte sobre el clima d'un augment de la concentració de  $\text{CO}_2$  en l'aire, assenyalant, a més, que alguns aspectes del problema ja havien estat tractats per Fourier i Tyndall, entre altres.

El que ocorre en realitat és que la vida és possible a la Terra gràcies a l'efecte hivernacle, conseqüència del diferent comportament de l'atmosfera terrestre en relació amb el balanç global de radiació:<sup>7</sup> mentre la nostra atmosfera és relativament transparent per a la radiació solar, la radiació infraroja que emet la superfície del planeta i la pròpia atmosfera és fortament absorbida en aquesta i parcialment reemesa cap al sòl. Açò fa que la temperatura superficial mitjana de la Terra siga d'uns  $15^{\circ}\text{C}$ , trenta-tres més que els que hi hauria de no existir l'atmosfera. Aqueix escalfament és a causa de l'efecte hivernacle. Amb

<sup>7</sup> El coneixement precís de la radiació (Llei de Planck de la radiació del cos negre) està molt relacionat amb un dels èxits de la física que més ha influït en el segle XX i que amb tota seguretat seguirà influïnt en aquest: la mecànica quàntica.

molt, el principal contribuent és el vapor d'aigua, sent en l'actualitat el  $\text{CO}_2$  el segon. L'home, que pot viure sobre la Terra gràcies a l'efecte hivernacle, és capaç d'influir sobre el sistema climàtic, pertorbant el clima. És l'única espècie vivent que pot fer-ho de forma apreciable. La biosfera ha aconseguit, durant milions d'anys de fotosíntesi, que una gran quantitat de carboni no estiga en l'atmosfera i que s'haja fixat en capes profundes de la litosfera i fons oceànics. De no ser així, la nostra atmosfera produiria un efecte hivernacle possiblement tan intens que la vida seria impossible.<sup>8</sup> L'home, en unes quantes dècades, ha aconseguit l'esgarriós "èxit" de tornar a l'atmosfera carboni (en forma d'un òxid,  $\text{CO}_2$ ) i s'ha encabotat a seguir fent-ho. Des del segle XIX, la seua concentració ha augmentat en una mica més d'un 30%, i es pensa que cap al final del present segle es podria fins i tot arribar a doblar el valor actual, la qual cosa representaria quasi triplicar la concentració anterior a la revolució industrial. El canvi de composició de l'atmosfera, com a conseqüència de l'activitat humana, intensifica l'efecte hivernacle natural i produeix un escalfament addicional en el planeta.

La pressió dels científics ha aconseguit que l'Organització de les Nacions Unides patrocinara el 1992 un acord internacional (Conveni de Nacions Unides sobre el Canvi Climàtic, un dels aprovats en l'anomenada Cimera de la Terra de Río de Janeiro) pel qual es pretén compatibilitzar el desenvolupament amb la preservació de la biosfera. Cinc anys més tard, a Kioto, es va acceptar prendre mesures perquè l'acció de l'home no fóra irreversible. El Protocol de Kioto, que així s'anomena el compromís, no ha pogut entrar en vigor perquè no ha estat ratificat pels signants requerits. Les majors dificultats per a la ratificació provenen dels Estats Units, primer contribuent mundial (amb les seues emissions) a la intensificació de l'efecte hivernacle. Si els Estats Units finalment no ratificaren el Protocol seria difícil que es poguera aplicar, tenint en compte els mínims exigits en el propi Protocol per a la seua posada en marxa.

Amb quasi tota seguretat, el problema del canvi climàtic serà un dels assumptes ambientals més importants del segle XXI, si és que no es converteix en el més important. Cal tenir en compte que, en el fons, la mitigació dels efectes del canvi climàtic implica un canvi de model econòmic a nivell mundial. Es tracta de no frenar el benestar, de fer que els països en vies de desenvolupament puguin aconseguir-lo i que no augmente la concentració de  $\text{CO}_2$  i altres gasos que posseeixen efecte d'hivernacle, fins valors insuportables per al planeta. Per aconseguir-ho s'ha de fer un ús més eficient de l'energia, s'ha de produir i usar tecnologia neta i també transferir-la als països menys desenvolupats, i s'han d'establir sistemes de capacitació en aqueixos països perquè no actuen de la mateixa manera que nosaltres ho hem fet. No cal explicar la necessitat de la investigació científicotecnològica i les enormes implicacions econòmiques de tot això.

Una de les conseqüències positives que ha tingut el Conveni esmentat és que Nacions Unides ha establert un grup mundial de científics per avaluar periòdicament l'estat de la qüestió en relació amb el canvi climàtic: l'IPCC (*Intergovernmental Panel of the Climate Change*). Cal dir a més que la pròpia existència de l'IPCC és una singularitat, ja que no hi ha cap altre organisme equivalent en els diferents camps del saber. En el seu últim informe, finalitzat recentment i encara sense publicar, s'hi recullen els millors resultats

<sup>8</sup> Al Sistema Solar tenim el cas excepcional de Venus, amb una atmosfera extraordinàriament rica en  $\text{CO}_2$ . La seua major proximitat al Sol, juntament amb aquest fet, donen lloc a una temperatura superficial d'uns 450° C.

actuals relatius a l'escalfament global per al segle XXI: pot arribar a ser de quasi 6° C, en valor mitjà per a tot el planeta. Veurem en el següent apartat com es pot arribar a determinar quantitativament aqueix valor.

## 7. Simulació i previsió numèriques

En l'actualitat, tant la previsió del temps com la simulació del clima estan basades en models. Els models no són més que simplificacions de la realitat que s'usen com a eines per descriure i explicar fenòmens d'interès científic, en aquest cas relacionats amb el temps i el clima. A vegades es construeixen els models mitjançant equacions matemàtiques deduïdes després d'una profunda anàlisi estadística de les variables que determinen el fenomen estudiat. Altres vegades són les lleis de la física, prèviament i independentment establertes, les que aporten les equacions que han de complir les diferents variables i, a més, permeten interpretar la causa d'aqueixa relació. Finalment, també són equacions matemàtiques les que relacionen les variables, però ara es basen en lleis físiques. En el cas que ens ocupa s'empren, almenys, les equacions dinàmiques de Navier-Stokes, l'equació de continuïtat per a la conservació de la massa, l'equació termodinàmica de l'energia i una equació d'estat.<sup>9</sup> Avui en dia, gràcies a la potència de càlcul i al coneixement matemàtic que hem adquirit, és possible resoldre les equacions d'un model una vegada discretitzades, açò és, escrites de forma adequada perquè un ordinador les puga tractar. Es fan milions i milions d'operacions en un gran nombre de punts de l'atmosfera (i també dels oceans i altres subsistemes, si es tracta de models climàtics) per a diferents instants fins a arribar al moment futur l'estat del qual es tracta d'esbrinar. Es parla llavors de models numèrics i de simulació numèrica (previsió numèrica del temps, com a cas particular).

Amb molta freqüència es diu que el procés de la simulació numèrica en meteorologia va començar, després de la II Guerra Mundial, quan John von Neumann, de la Universitat de Princeton, i Rossby van convocar el 1946 una Conferència sobre Meteorologia l'objectiu de la qual era aconseguir la predicció del temps per mitjà de les equacions esmentades anteriorment. Per a l'ocasió disposaven d'un ordinador que havia estat utilitzat en la guerra i aleshores cedit per a una primera aplicació civil. Es tractava de l'ENIAC (*Electronic Numerical Integrator, Analyzer and Computer*) que, evidentment, no superaria avui el més mínim control de qualitat. El primer experiment es va realitzar el 1950 després d'importantes modificacions en les equacions del model. A elles tornarem un mica més endavant.

Cal indicar tanmateix que aquell no va ser, de cap manera, el primer experiment sobre la previsió numèrica del temps. De fet, Bjerknes ja ho havia plantejat, però no ho va intentar. Sí que ho va intentar, però, Lewis Fry Richardson, físic i meteoròleg anglès. Estava interessat en la resolució numèrica d'equacions diferencials. Cap a 1913, ho va aplicar a la solució de les equacions hidrodinàmiques.

<sup>9</sup> El conjunt d'aqueixes equacions rep diferents denominacions: equacions de govern, equacions primitives, equacions hidrodinàmiques o equacions termohidrodinàmiques.

Si estan adequadament escrites, en els primers membres figuren les variacions locals amb el temps de cada una de les variables, mentre que en els segons membres hi ha les derivades espacials, avaluable sobre el mapa del temps al qual se superposa una malla. Els valors de les variables es llegeixen en els punts de la malla i a partir d'ells s'avaluen les derivades respecte a les coordenades, amb la qual cosa es coneixen les variacions temporals. Si es disposa dels valors de les variables en l'instant inicial és possible obtenir-les en un instant posterior: és a dir, s'ha fet una predicció de les esmentades variables. Amb els seus valors com a nous valors inicials i repetint el procés, es pot en principi obtenir una previsió de les variables per a l'interval de temps desitjat.

Per al seu càlcul, Richardson va partir de l'anàlisi sinòptica més completa de la seua època: la del 20 de maig de 1910 a les 7 del matí, realitzada per Bjerknes. Després de mesos d'aclaparador treball numèric (ell només, amb regle de càlcul i taules de logaritmes: ni tan sols tenia calculadora mecànica), realitzat, en part, en condicions penoses (durant el seu servei a França<sup>10</sup> en la I Guerra Mundial), va obtenir els valors previstos de vent i pressió per a sis hores més tard (amb només un interval d'integració) en dos punts, un d'ells prop de Munic. Els resultats van ser decebedors: pronosticava una pujada de pressió de 145 mil·libars en sis hores, unes 70 vegades el valor observat. Malgrat això, Richardson va publicar en un llibre el 1922 els seus resultats.

Gràcies a aquesta publicació s'ha pogut investigar sobre les causes del fracàs. Si no s'analitza en profunditat l'experiment de Richardson, podria semblar que l'error es va deure al desconeixement en aquella època de l'anomenada inestabilitat de càlcul. De fet, sis anys després de publicat el treball, els matemàtics alemanys Courant, Friedrichs i Lewy van descobrir que en aquell tipus de càlculs és necessari que el quocient entre el braç de la malla usada i el temps d'un pas d'integració siga major que la velocitat de propagació de les ones més ràpides que siguen solució de les equacions. Si no es compleix aquesta condició, anomenada d'estabilitat de càlcul, la part de la solució corresponent a ones ràpides (les sonores, per exemple) falseja per complet la solució d'interès meteorològic. Però, malgrat que en l'experiment no es complia la condició d'estabilitat de càlcul, aquesta no va poder ser la causa de la fallada, perquè Richardson va efectuar la integració numèrica en només un pas. La raó és una altra, en part ja comentada, però en un altre context. Les forces de pressió i Coriolis estan quasi compensades en les equacions del moviment horitzontal, i en la del vertical ho estan la component de la força bàrica i la gravetat. Les acceleracions, doncs, són petites diferències entre dos termes grans que no es poden mesurar amb la precisió necessària. Per això els resultats no oferien garantia.

Això és just el que va ocórrer en el cas tractat per Richardson, i precisament el que es va tractar d'evitar anys després en l'experiment de l'ENIAC. Per fer justícia a Richardson, cal dir que va estar a punt de descobrir la inestabilitat de càlcul en un exemple posterior amb cinc passos d'integració. Quasi es pot assegurar que ho haguera aconseguit de disposar d'algun mitjà de càlcul, per rudimentari que haguera estat. Però no va poder ser; el seu intent va anar per davant dels avanços tecnològics.

---

<sup>10</sup> Richardson era quàquer i, com tal, objector de consciència; però això, al seu mode de veure, no l'eximia de servir el seu país ni d'ajudar els seus semblants; tan sols li impedia fer-ho en qualitat de combatent. Va estar dos anys i mig a França en una unitat sanitària.

Si es pensa en la inestabilitat de càlcul, en principi és possible evitar-la augmentant el braç de la malla o disminuint el pas de temps. En el primer cas es perd resolució espacial en la simulació, la qual cosa no és convenient, i en el segon és necessari realitzar un nombre més gran de passos d'integració per arribar al mateix instant de pronòstic, la qual cosa pot ser impossible depenent de la potència de càlcul. Els nostres simuladors dels anys quaranta van actuar més intel·ligentment, o van haver d'actuar així, perquè no podien elegir ordinador. Van optar per eliminar de les equacions termohidrodinàmiques les ones més ràpides perquè deixaren de ser solució. D'aquesta forma es treballa amb petites desviacions respecte a l'equilibri entre les forces de Coriolis i de pressió en les equacions per al moviment horitzontal, i amb ajust hidrostàtic en l'equació per al moviment vertical. Les equacions resultants es denominen quasigeostròfiques, fent així referència a la petita desviació front a la geostrofia, que representa l'equilibri entre les forces horitzontals esmentades abans. Una posterior simplificació de les equacions va permetre el plantejament de l'anomenat model barotròpic equivalent, que va ser resolt per l'ENIAC en una simulació de 24 h en quasi 24 h de temps de càlcul! Avui en dia, amb un ordinador personal, es realitza el mateix experiment en pocs minuts.

La teoria quasigeostròfica del moviment atmosfèric ha estat un dels majors avanços a nivell teòric en meteorologia, ja que, després d'haver facilitat la primera simulació mitjançant ordinador, ha permès conèixer amb gran detall el funcionament de les perturbacions atmosfèriques responsables del mal temps en latituds mitjanes. Dels iniciadors de la teoria, entre altres, s'ha de citar a Jule G. Charney i, entre els que han permès el seu tancament, a Brian J. Hoskins. A més, s'ha pogut comprovar que el mateix tipus d'aproximació quasigeostròfica és útil per al moviment oceànic, fins i tot amb una millor precisió.

A partir de la dècada dels 70, els models estan basats directament en les equacions primitives i, a mesura que la potència de càlcul ho ha anat permetent, s'ha millorat també la resolució, tant horitzontal com vertical.

El que s'ha dit anteriorment ha de permetre la comprensió del problema de la previsió del temps. La simulació del clima és una mica diferent, a pesar de l'origen comú, perquè els primers models de simulació climàtica van ser els meteorològics convenientment adaptats. Per tal d'entendre el problema climàtic es pot pensar en la realització d'un gran nombre d'experiments de simulació per a una època determinada, obtenint-se la informació climàtica per mitjà d'un tractament estadístic de tots aqueixos experiments. A més, és imprescindible tenir en compte, junt amb l'atmosfera, els altres subsistemes del sistema climàtic.

Per verificar la validesa del procediment s'han realitzat experiments de simulació del clima present i del clima passat, amb molts bons resultats. Açò ha fet que es pugui abordar el problema de la projecció cap al futur del clima present. Com s'haurà observat, no es parla de predicció del clima. La raó és que el plantejament és diferent del de la predicció del temps. En aquest cas es coneixen les condicions inicials, com evoluciona l'atmosfera, i es dedueix l'estat atmosfèric futur, per a un instant prescrit.

El problema del clima és que, com s'ha dit, es té el coneixement de la influència de l'home en la seua evolució com a conseqüència de la intensificació de l'efecte hivernacle, produïda per les emissions de gasos amb aqueix efecte. No obstant, no es pot quantificar

aqueixa influència, ja que depèn de com puguem evolucionar cap al futur factors i condicions que desconeixem (desenvolupament econòmic, població, polítiques de limitació d'emissions de gasos amb efecte hivernacle, avanços tecnològics, etc.). Per salvar aquest escull s'ha obert un ventall de diferents possibilitats que han permès establir uns denominats *escenaris socioeconòmics* i, a partir d'ells, un conjunt d'*escenaris d'emissions* (per obtenir major informació es pot consultar la direcció d'internet <http://www.ipcc.ch>). Per a cada u d'aqueixos escenaris d'emissions s'obté, mitjançant models de simulació climàtica, un escenari de clima futur (per exemple, per a mitjan o final del present segle). Si el mateix model s'empra per simular el clima futur, però sense modificar les condicions actuals, s'obté informació sobre el clima esperable sense el paper pertorbador de l'home per mitjà de les emissions. Per diferència entre els dos tipus de simulacions es dedueixen els *escenaris de canvi climàtic*. Cal notar aleshores que hi haurà tants escenaris climàtics plausibles com a escenaris d'emissions, esperant-se que el clima del futur es trobe dins del ventall obert per les diferents possibilitats.

L'augment de temperatura per a final del segle XXI que s'ha comentat amb anterioritat correspon a una mitjana entre els diferents escenaris de clima futur considerats.

## 8. Problemes pendents

Després de la lectura dels comentaris anteriors, el lector no ha de quedar-se amb la idea que tot està resolt en les ciències de l'atmosfera. En realitat, com s'ha indicat en la introducció, només s'han volgut ressaltar ací unes quantes fites en la història de la ciència meteorològica. Hi ha en realitat una gran quantitat de problemes sense resoldre, dels quals farem una selecció a continuació.

Un dels assumptes reconeguts com molt difícils en la física clàssica és el de la turbulència. El trànsit a la turbulència des d'un règim laminar en el moviment d'un fluid té molt a veure amb el caos, però només saber això no resol el problema. La turbulència en l'atmosfera és molt important, sobretot en la capa fronterera planetària on es deixen sentir els efectes de la interacció amb la superfície del planeta, justament allí on vivim. Els models de simulació no poden resoldre escales de moviment menors que el braç de la malla que s'utilitza per discretitzar les equacions. Com no se sap explicar adequadament la turbulència, no queda un altre remei que establir relacions empíriques o semiempíriques entre les propietats turbulentes, subreticulars, i les variables avaluable en els punts de la malla emprada.<sup>11</sup> El coneixement adequat de la turbulència permetrà evitar aqueix tipus d'aproximacions i, el que és més important, reduir el braç de malla i guanyar resolució espacial. D'altra banda, en el procés d'anar guanyant resolució espacial, s'espera que tinga un paper important l'adequada incorporació d'informació satel·litària, així com la provinent d'altres sensors remots o plataformes.

Un altre procés subreticular que també requereix un tractament semblant és el de la formació dels núvols i de la precipitació. Hi ha diferents models de convecció en núvols que proporcionen resultats útils per a diferents aplicacions, però no hi ha una teoria

<sup>11</sup> En la terminologia dels modelistes, es denominen parametritzacions a les relacions entre propietats turbulentes i del flux mitjà. Es diu també que constitueixen la "física" del model, terme que, de totes totes, és incorrecte perquè les equacions de Navier-Stokes de les quals provenen els models són evidentment físiques.



general que permeta el tractament dels núvols per a qualsevol escala de moviment. D'altra banda, els núvols constitueixen un sistema molt complex des del punt de vista de l'intercanvi radiatiu i tampoc no està resolt el seu comportament, intensificant o atenuant l'efecte hivernacle. Aquest fet introdueix incerteses en les simulacions climàtiques, per la qual cosa és un dels temes d'activa investigació.

A més d'aquest, hi ha altres assumptes oberts quant a les projeccions climàtiques per trobar escenaris climàtics futurs. El primer que comentarem té també a veure amb la variabilitat subreticular i la resolució dels models. L'ús possiblement més important dels escenaris de clima futur és l'avaluació dels impactes potencials del canvi climàtic. No obstant, la resolució espacial dels models globals de clima fa que no es pugui deduir cap variabilitat espacial de cap variable en un reticle d'uns 200•200 km<sup>2</sup>, amb la qual cosa l'avaluació dels impactes no pot ser prou precisa. La potència de càlcul no permet avui per avui millorar molt la resolució per a tot el globus, a pesar que s'estan usant els millors ordinadors en els centres d'investigació més importants, per la qual cosa cal recórrer a procediments que aconseguisquen guanyar resolució, encara que siga només en zones determinades del planeta. El mètode, que es denomina *downscaling* perquè implica guanyar informació en un procés "de dalt a baix" en l'escala espacial, representa una de les línies més dinàmiques en la investigació climàtica.

Com ha degut quedar clar més amunt, el canvi de la composició química de l'atmosfera ha produït, i s'espera que segueixi produint durant moltes dècades, la intensificació de l'efecte hivernacle. Es diu habitualment que hi ha una relació entre la química i el clima. La química de l'atmosfera és en si una disciplina molt moderna i, per tant, poc coneguda i activa. A més del problema del "forat d'ozó", resolt teòricament i que ha donat lloc a un Premi Nobel, hi ha molts altres. No es coneixen prou les reaccions que es poden produir en l'atmosfera terrestre o en interacció amb altres subsistemes del sistema climàtic i que resulten imprescindibles per aconseguir que els models incloguen "química" realment interactiva.

Per finalitzar, voldríem donar unes pinzellades sobre la importància social de la meteorologia i de la climatologia, i de la ciència en general. No ha de resultar molt difícil convèncer el lector que tota la història de la meteorologia ha estat guiada per un interès social. Pràcticament totes les nostres activitats tenen a veure amb les condicions ambientals i, entre altres raons, el clima ha estat un dels motors de la humanitat per aconseguir assentaments confortables, estables o no, sobre la faç de la Terra. Tot això dóna un valor socioeconòmic molt important a aquestes dues ciències de la Terra. I què dir respecte al clima del futur, en part conseqüència del comportament humà, que amb seguretat influirà en el mode de vida i en el model econòmic de les generacions futures. És tan important el que ens estem jugant que molts ho veuen en termes econòmics, la qual cosa no és dolent. Però sí que ho és el veure-ho només en termes econòmics. Des del punt de vista de la ciència, aquest comportament mostra que la capacitat d'influència dels científics és per desgràcia molt baixa. Seria desitjable i necessari que la ciència aconseguís un nivell d'influència en el món i un reconeixement social molt major del que actualment posseeix. I açò, que és així en termes generals, ho és molt més a Espanya, on els diferents governs no han facilitat la incorporació de la major part de les ciències als corrents de millora del coneixement que inclouen als països més avançats del món.

**BIBLIOGRAFIA**

- FRIEDMAN, R.M. (1989): *Appropriating the Weather. Vilhelm Bjerknes and the Construction of a Modern Meteorology*, Cornell University Press.
- PLATZMAN, G.W. (1967): «A retrospective view of Richardson's book on weather prediction», *Bulletin of the American Meteorological Society*, 48, 8, 514-550.
- PUIGSERVER, M. (1992): «Evolución de las ideas sobre la predicción científica del tiempo», *Memòries de la Reial Acadèmia de les Ciències i Arts de Barcelona*, LI, 7, 225-280.