

**SOCIETAT CATALANA
DE FÍSICA (1)**

ÉS UNA CIÈNCIA EXACTA,

LA METEOROLOGIA?,

A CÀRREC DE

BERNAT CODINA,

DE LA UNIVERSITAT DE BARCELONA

INTRODUCCIÓ

Segons el diccionari de l'Institut d'Estudis Catalans, la meteorologia és la branca de la física que s'ocupa de l'estudi de l'atmosfera. Que la meteorologia és una ciència està fora de tot dubte, però que es tracta d'una branca de la física, pot resultar desconcertant. Probablement, el profà en la matèria —o potser no tan profà perquè segueix amb gran interès l'espai dedicat al temps dels mitjans de comunicació— classificaria la meteorologia dins de l'àmbit de les ciències naturals.

De fet, fins al final del segle XIX, la metodologia emprada en l'estudi de l'atmosfera era la pròpia de les ciències de la naturalesa. Àdhuc en els nostres temps, la introducció al temps i al clima en els cicles primari i secundari de l'ensenyament es fa des d'aquesta perspectiva. No obstant això, ja fa molts anys —des del començament del segle XX— que se sap caracteritzar l'atmosfera a partir de les lleis físiques que hi operen.

En aquesta contribució es pretén posar de manifest que, malgrat que les previsions meteorològiques no siguin prou acurades, la meteorologia és, efectivament, una branca de la física i, com a tal, una ciència exacta.

FÍSICA I METEOROLOGIA

Com que l'atmosfera és un fluid, pot ser estudiada utilitzant la metodologia pròpia de la mecànica de fluids. En essència, la segona llei de Newton, les lleis de conservació de la massa i de l'energia i l'equació d'estat dels gasos, expressades convenientment, permeten obtenir un sistema d'equacions diferencials que descriu, amb pèls i senyals,¹ el ritme de varia-

1. En el seu plantejament, que no es descriu en aquest resum, l'enfocament del problema és completament mecanicista i atomista. D'aquí, doncs, l'expressió «amb pèls i senyals».

ció, en cada punt de l'espai, de les variables d'estat atmosfèriques (pressió, temperatura, vent, humitat).

La resolució d'aquest sistema d'equacions diferencials constitueix, des del punt de vista matemàtic, un problema de valors inicials: coneguda la distribució espacial de les variables d'estat en un instant de temps determinat, la seva distribució en qualsevol altre instant de temps resta definida pel mateix sistema d'equacions. Es disposa, així, d'un mètode físicomatemàtic per portar a terme la predicció el temps: sabent exactament quin temps fa ara (és a dir, la distribució tridimensional de les variables d'estat atmosfèriques) és possible saber quin temps farà en qualsevol instant futur resolent el sistema d'equacions diferencials.

És ben paradigmàtic el problema de balística que saben resoldre la major part d'alumnes de batxillerat: calcular la trajectòria d'un projectil coneixent-ne la velocitat inicial i l'angle de llançament. En aquest cas, la trajectòria s'obté en aplicar la segona llei de Newton al projectil, considerant que l'única força significativa que actua sobre la bala és el mateix pes, i resoldre l'equació diferencial obtinguda. S'obté de solució una trajectòria que resulta ser parabòlica i, d'aquesta manera, és possible saber, per a cada instant de temps, quina és la posició del projectil.

Aquest no és més que un senzill exemple per posar de manifest que la física clàssica permet predir el futur, en aquest cas el camí que descriuria el projectil un cop abandonés el canó. Conceptualment, el procediment que es fa servir a l'atmosfera és el mateix, però la resolució completa del sistema d'equacions diferencials està farcida de dificultats.

La primera formulació de les equacions que regeixen el comportament de l'atmosfera va anar a càrrec del noruec V. Bjerknes l'any 1904. Ell mateix ja es va adonar que, com que el sistema d'equacions obtingudes (anomenades equacions primitives de la dinàmica atmosfèrica) no tenia solució analítica, no era possible atacar el problema de la predicció del temps de la mateixa manera que en el cas del projectil, és a dir, integrant les equacions diferencials que descriuen el fenomen que, en l'exemple de balística, tenen solució analítica.

A falta de solucions analítiques, calia optar per la resolució numèrica de les equacions primitives, cosa que no era factible portar a terme en aquella època per la inexistència de sistemes de càlcul d'alta velocitat. Tot i això, el britànic F. L. Richardson (1922) va fer un experiment en aquest sentit durant la Primera Guerra Mundial, que va consistir a efectuar una integració de les equacions primitives per fer una predicció del temps per a Centreuropa, utilitzant com a valors inicials de les variables d'estat atmosfèriques, les obtingudes en una campanya intensiva d'observació.

Preparant amb molta cura un robust algorisme de resolució de les equacions primitives, i amb l'ajut de mètodes de càlcul mecànic implementats per persones, Richardson va completar el primer pas d'integració, i obtingué, ja aleshores, uns resultats tan poc encoratjadors que el van desanimar a prosseguir. Alguns textos especialitzats parlen del «fracàs de l'experiment de Richardson», tot i que no es pot considerar com a tal, perquè el mateix autor va ser capaç de detectar la causa de l'error d'integració (inacurada representativitat de l'estat inicial) i, a més, l'algorisme que va dissenyar era realment impecable.

La possibilitat de resoldre numèricament les equacions primitives es va abandonar completament (encara que l'experiment de Richardson hagués donat bons resultats, tampoc no

era factible portar-lo a terme operativament), i la meteorologia de la primera meitat del segle XX es va concentrar en l'establiment de teories sobre el moviment atmosfèric, fonamentades, òbviament, en les mateixes equacions. De fet, aquesta va ser l'època daurada de la meteorologia pel que fa al seu desenvolupament teòric, que va culminar, sobretot, amb la teoria quasigeostròfica² (Charney, 1947).

Va ser aleshores també (Charney *et al.*, 1950) que es va portar a terme la primera predicció numèrica del temps reeixida, no pas directament a partir de les equacions primitives, sinó d'una variant molt simplificada (el model barotròpic). I per primera vegada es van fer servir sistemes automàtics de càlcul: el famós ordinador ENIAC, que és considerat el primer ordinador electrònic de la història, dissenyat durant la Segona Guerra Mundial per efectuar càlculs balístics, i que, acabada la guerra, va ser destinat a usos civils.

Al final dels anys seixanta es va retornar als orígens, integrant directament i numèrica les equacions primitives. Aleshores els sistemes de càlcul ja eren força més potents, la xarxa d'observació meteorològica era prou densa, i se sabia

2. Pot resultar desconcertant aquesta afirmació, tenint en compte que hom té la sensació que les previsions meteorològiques han millorat considerablement en els darrers anys, i que es disposa d'eines d'observació meteorològica privilegiades (radars, satèl·lits, estacions automàtiques, etc.), que no existien en el passat. La realitat és que tot aquest progrés de l'últim quart de segle ha anat paral·lel al desenvolupament tecnològic, sobretot de les telecomunicacions i la computació, cada vegada més barata i de més prestacions. Tanmateix, hom es nodreix majoritàriament, encara, dels desenvolupaments teòrics que es van portar a terme molts anys enre. Per exemple, s'ha posat de moda en els darrers anys, intentar estudiar l'atmosfera mitjançant simulacions realitzades utilitzant models meteorològics (vegeu la nota 4). Això només són caixes negres: faciliten un cert grau d'operativitat, que pot ser molt rellevant en algunes aplicacions, però difícilment permeten aprofundir en el coneixement; la simple acumulació de fets o observacions rarament comporta explicacions satisfactòries dels fenòmens.

com abordar la principal dificultat que havia espantat la integració de Richardson quaranta anys abans.

EL PROBLEMA DE LA DISCRETITZACIÓ DE L'ESPAI I EL TEMPS

La cerca d'una solució numèrica de les equacions diferencials que caracteritzen el moviment atmosfèric implica la discretització de l'espai i el temps. Pel que fa a la primera, l'atmosfera es trosseja idealment en un conjunt de cel·les, la dimensió horitzontal típica de les quals oscil·la entre 10 i 50 km de costat en funció de l'extensió de la regió que es pretén estudiar, i la vertical és variable, de 10 a 500 m, creixent amb l'alçària, de manera que hi hagi més «detall» en els nivells més propers a terra.

A cada cel·la se li atribueix inicialment un valor determinat de cada una de les variables d'estat atmosfèriques. A més, les derivades parcials del sistema d'equacions diferencials se substitueixen per diferències finites, i es transforma tot plegat en un sistema d'equacions algebraïques, de resolució força immediata.

Aquesta estratègia té, tanmateix, dos punts febles importants:

- Els fenòmens que és possible caracteritzar són, en el millor dels casos, aquells que tenen una semilongitud d'ona típica de l'ordre del pas de discretització. Per exemple, si es trosseja l'atmosfera en cel·les de 50 km de costat horitzontal, és possible estudiar bé les estructures sinòptiques, que corresponen a l'escala típica dels tradicionals mapes del temps que representen el camp d'isòbares, els anticiclons, depressions i fronts, però no és possible resoldre els fenòmens d'escala més petites (marinades, interaccions del flux amb l'orografia, tempestes, etc.).

En llenguatge planer diríem que el mètode numèric d'integració pateix miopia.

- A més, els processos que tenen lloc a escales més petites s'han de tenir en compte d'alguna manera perquè, a la curta o a la llarga, molts d'ells influeixen en la dinàmica de l'escala resolta per la mateixa discretització. Un cel esquitxat a mig matí per cúmulus *humilis*, per exemple, palesa la petita escala horitzontal de la convecció humida en un primer moment. Ara bé, hi ha ocasions en què aquests núvols acaben produint cumulonimbus de grans dimensions. Si en un primer moment la formació de cúmuls era irrellevant per a un «trossejat atmosfèric» o graella de 20 km de costat, per exemple, és obvi que l'envergadura del cumulonimbus posterior afecta, entre altres coses, la radiació solar que arriba a terra, el camp de vents, etc., en la mateixa escala del «trossejat».

113

Una manera de superar aquesta dificultat consistiria a disminuir el pas de malla de la graella, però això no es pot portar a terme *ad infinitum* perquè, entre altres raons, es desconeix l'estat de l'atmosfera amb tant de detall. A la pràctica el que es fa és utilitzar les anomenades *parametritzacions*, que permeten introduir l'efecte estadístic que produeixen els processos a petita escala (turbulència, convecció...) sobre la situació meteorològica descrita per la graella. A més d'això, mitjançant parametritzacions³ també es caracteritzen les interaccions de l'atmosfera amb la radiació solar, la litosfera, la

3. En introduir les parametritzacions canviem el punt de vista mecanicista que presentaven les equacions primitives en estat pur, per un enfocament holístic. És aquesta, de fet, la situació habitual en gran part de les aplicacions de la física.

hidrosfera i, en aplicacions molt sofisticades, amb la biosfera i l'esfera socioeconòmica.

Tot i que no és l'única ni última causa, la resolució numèrica de les equacions primitives, que, com s'acaba de veure, implica la introducció d'aproximacions, incrementa notablement la incertesa en la predicció del temps.

Finalment, també és necessària la discretització temporal. Afortunadament en aquest cas, el «trossejament» del temps, si es porta a terme correctament, no constitueix un factor més d'incertesa. No obstant això, sí que és un factor que limita la resolució espacial amb què es pot estudiar el comportament de l'atmosfera integrant les equacions primitives. L'any 1928, Courant, Friedrichs i Lewy (CFL) van demostrar que els passos d'integració espacial i temporal no es poden escollir arbitràriament. Hi ha una proporcionalitat inversa entre l'un i l'altre.

Així, en doblar la resolució horitzontal, és a dir, en dividir el pas de malla per la meitat, el nombre de punts de la graella es multiplica per 4 i, com a conseqüència de la condició CFL, el nombre de passos d'integració augmenta en un factor 2. Així doncs, el temps de computació per efectuar una determinada simulació atmosfèrica es multiplica per 8. En altres paraules, el requisit d'un pas de malla ben petit per evitar el problema de la miopia esmentat abans entra en conflicte amb la necessitat, en la predicció meteorològica, per exemple, d'integrar les equacions més de pressa que el temps (el temps meteorològic, és clar).

COM SABEM QUIN TEMPS FA?

Aquesta pregunta no té una resposta tan senzilla com podria semblar a primer cop d'ull. Com ja s'ha dit, per a la integració de les equacions primitives cal el coneixement de les variables

d'estat atmosfèriques en un determinat instant de temps. Aquestes variables s'obtenen bàsicament, encara avui dia, de la xarxa d'estacions meteorològiques tradicionals, tant de superfície com d'altura. Aquestes darreres es recullen en alguns observatoris (estacions de radiosondatge) que llancen periòdicament globus sonda dotats de sensors que transmeten dades del perfil vertical de temperatura, humitat, vent i pressió (<http://infomet.fcr.es/raob>).

En utilitzar les dades d'aquesta xarxa per descriure l'estat inicial, sorgeixen un parell de dificultats importants:

- Problemes de cobertura i de representativitat. En superfície, la xarxa d'estacions sinòptiques dóna bona cobertura a les regions habitades dels països desenvolupats, però és més magre en regions marítimes o poc habitades. Menys falaguera és la situació de la xarxa de radiosondatges, que ha de caracteritzar l'estat de l'atmosfera segons la vertical. A més, les dades s'han d'interpol·lar als punts de la graella que s'utilitza per a resoldre les equacions. Si, per exemple, a l'àrea de Barcelona disposem d'estacions a la Vila Olímpica, a l'aeroport, al Fabra i a Badalona, quina és la més representativa del punt de graella més proper?
- Consistència dinàmica de les observacions. Les variables d'estat han de complir en tot moment els condicionaments físics imposats per les mateixes equacions, que no són més que l'expressió matemàtica de lleis universals de la física clàssica. En particular, aquests condicionaments s'han de complir també en l'estat inicial. Amb dades observades per les estacions meteorològiques, rarament ubicades als nusos de la graella, és molt poc probable que es verifiquin aquests condicionaments. La incon-

sistència de les dades introdueix desequilibris en l'estat inicial, que contaminen les solucions. Aquest fet es posa clarament de manifest en considerar el problema de determinar el moviment de la superfície lliure de l'aigua d'un estany. És evident que si a l'estat inicial la superfície de l'estany és completament horitzontal, així hi romandrà durant la integració de les equacions que descriuen el comportament de la superfície lliure de l'aigua. Però suposi's ara que es decideix amidar, per algun procediment, el nivell de la superfície lliure: malgrat que sigui completament horitzontal, no és possible constatar exactament aquest estat a partir de mesures experimentals afectades, inevitablement, per errors. En resoldre les equacions amb aquestes dades inicials, s'obtindria com a solució un conjunt d'ones gravitatòries a la superfície lliure de l'estany. És a dir, una solució incorrecta.

Aquesta fou la raó que va frustrar l'experiment de Richardson: les dades inicials de què disposava eren dinàmicament inconsistents, i van introduir unes velocitats verticals fictícies en l'estat inicial que van arruïnar la solució ja en el primer pas d'integració. Actualment hi ha sofisticades tècniques d'inicialització que serveixen per a prevenir aquest greu problema. A grans trets, i encara que pugui semblar sorprenent, els valors inicials que normalment s'utilitzen per a iniciar el procés d'integració s'obtenen a partir d'una resolució prèvia de les equacions primitives, corregida convenientment amb les dades observades.

Al començament de la dècada dels seixanta, el meteoròleg americà E. Lorenz s'adonà de l'extremada sensibilitat a les condicions inicials dels sistemes d'equacions diferencials no lineals que descrivien fenòmens convectius ben simples. En el seu article de 1963, publicat en el *Journal of Atmospheric Sciences* —probablement l'article meteorològic més citat tant des de dins com des de fora del món de la meteorologia—, Lorenz presentava els resultats d'un fenomen aparentment tan simple com el moviment convectiu d'un fluid escalfat per sota.

Caracteritzava la convecció mitjançant tres variables i, en representar-les en funció del temps, no hi observava cap mena de comportament periòdic. L'absència de comportaments d'aquest tipus posa de manifest la naturalesa caòtica del moviment, malgrat estar perfectament caracteritzat per les lleis de la física clàssica, rotundament determinista.

A més, en representar paramètricament (fent servir el temps com a paràmetre) una de les variables descriptives del procés convectiu en funció de les altres (representació en l'espai de fases), obtenia una figura (la famosa papallona de Lorenz) que donava compte de la gran sensibilitat a les condicions inicials. En l'espai de les fases, les trajectòries corresponents a dos punts molt propers, equivalents a dos estats molt semblants, podien divergir ràpidament al cap de molt poca estona, amb la qual cosa representaven estats radicalment diferents.

L'atmosfera, molt més complexa que un simple fluid escalfat per sota, no està exempta, òbviament, d'aquest comportament, ben diferent de l'exemple del projectil amb què s'inicia aquest article. En aquest exemple, modificant lleugerament la velocitat de llançament, s'obté una trajectòria que experimenta una variació molt petita. A l'atmosfera, en canvi, una petita modificació de la representació de l'estat inicial pot donar lloc a una evolució futura radicalment diferent.

Anys més tard, al començament dels setanta, Lorenz va tornar a publicar un estudi teòric en la mateixa línia però aplicat a l'atmosfera, en el qual mostrava l'existència d'un límit de predictibilitat, inherent a la mateixa atmosfera, d'unes tres setmanes. Això no impedeix, tanmateix, la possibilitat de fer prediccions climàtiques basades, també, en la resolució de les equacions primitives. En aquest cas no interessa tant l'evolució de les trajectòries de l'espai de fases (la meteorologia o el temps de cada dia), sinó la regió on estan confinades aquestes trajectòries (el clima). La predicció del clima mitjançant la integració numèrica de les equacions primitives és més un problema de condicions de contorn que de condicions inicials, al contrari de la predicció meteorològica.

La naturalesa no determinista del moviment atmosfèric suggereix la utilització de les anomenades *prediccions per conjunts*, que consisteixen a resoldre diverses vegades les equacions primitives modificant lleugerament les condicions inicials en cada una d'elles. D'aquesta manera s'obté un conjunt de solucions a partir de les quals és possible assignar una determinada probabilitat a les diverses configuracions meteorològiques.

CONCLUSIONS

Actualment, i des de fa una mica més d'un quart de segle, la base de les prediccions meteorològiques —els mapes del temps que sovint mostren alguns mitjans de comunicació quan presenten el butlletí meteorològic— radica en la integració del sistema d'equacions primitives.⁴ Equacions que, com

4. Un *model meteorològic*, expressió que en els últims temps ha passat a formar part del vocabulari meteorològic habitual, no és més que una forma concreta d'expressar les equacions primitives, adaptada a una

s'ha vist, descriuen perfectament el comportament de l'atmosfera, però que, a l'hora de la veritat, tampoc no permeten afinar prou bé les previsions. Com hem vist, dos en són els motius:

- La solució del sistema d'equacions no és senzilla. Involucra una quantitat enorme de càlculs (un programa informàtic llarguíssim) que s'han de portar a terme sobre una representació simplificada de l'atmosfera, que consisteix a trossejar-la horitzontalment i verticalment. A la pràctica, l'atmosfera no es pot tractar com un contínuum, sinó en forma de blocs o caixes, de dimensions enormes (10 o 20 km de costat horitzontal). Molts fenòmens que poden tenir lloc dins d'aquestes caixes passen desapercebuts o s'han de representar mitjançant aproximacions més o menys empíriques (parametritzacions).
- A més, per resoldre les equacions cal saber molt bé quin és l'estat inicial de l'atmosfera, és a dir, tenir un bon coneixement del temps que fa en un instant de temps determinat. I cal saber-ho a l'escala en què treballa el model meteorològic que, com s'ha indicat, és força «miop». A més, la solució de les equacions (és a dir, la predicció del temps) és molt sensible a l'estat inicial: estats inicials molt semblants poden donar lloc situacions meteorològiques molt diferents al cap d'unes quantes hores.

119

Ara bé, el fet que en aplicar aquesta metodologia a la predicció del temps els resultats no siguin acurats no significa

determinada graella i a les condicions de contorn d'una determinada regió, i l'algorisme numèric i informàtic per portar a terme la seva integració.

que la meteorologia no sigui una ciència exacta. Si s'accepta la definició de ciència exacta com aquella que mitjançant càlculs numèrics o la utilització de fórmules o lleis genèriques obté els seus resultats davant d'un problema o fenomen natural, sens dubte la meteorologia ho és.

BIBLIOGRAFIA

BJERKNES, V. (1904). «Weather forecasting as a problem in mechanics and physics». *Meteorol. Z.*, 21, p. 1-17.

CHARNEY, J. G. (1947). «The dynamics of long waves in a baroclinic westerly current». *J. Atmos. Sci.*, 19, p. 30-38.

CHARNEY, J. G.; FJÖTOFT, R.; NEUMANN, J. VON (1950). «Numerical integration of the barotropic vorticity equation». *Tellus*, 2, p. 237-254.

120

COURANT, R.; FRIEDRICHS, K.; LEWY, H. (1928). «Ueber die partiellen Differenzgleichungen der mathematischen Physik». *Math. Ann.*, 100, p. 32-74.

LORENZ, E. (1963). «Deterministic non-periodic flow». *J. Atmos. Sci.*, 20, p. 130-141.

RICHARDSON, L. F. (1922). *Weather prediction by numerical processes*. Cambridge: Cambridge University Press. 236 p.