

SOCIETAT CATALANA

DE BIOLOGIA

POBLACIÓ I CLIMA A LA TERRA:

GENERACIÓ I EVOLUCIÓ

D'ESTRUCTURES DISSIPATIVES,

A CÀRREC DE XAVIER RODÓ,

DE LA INSTITUCIÓ CATALANA

DE RECERCA I ESTUDIS AVANÇATS

I DE LA UNIVERSITAT DE BARCELONA

L'ésser humà interactua amb el seu entorn com un sistema dissipatiu. El sistema climàtic terrestre també es pot assimilar a aquest tipus de dinàmiques, en què les entrades d'energia es produeixen en unes finestres determinades, en general per damunt d'uns llindars, o en finestres que després dissipen l'energia i generen estructura o la destrueixen, bé a l'atmosfera, a l'oceà o fins i tot en les poblacions i els sistemes socioeconòmics (figura 1). A escala planetària, hi ha unes regions en el diagrama espai-temps on aquesta estructuració pot ser més facilitada, de manera que la diagnosi de sèries i/o matrius de dades instrumentals o registres paleoclimàtics allà ens permet veure com aquestes estructures es van repetint, o no, al llarg del registre històric i com, per exemple, també poden haver canviat en funció dels canvis en els factors que les generen i en les condicions de contorn del sistema que les acota. Aquesta repetició genera un cicle o pic en l'espectre de variàncies, de vegades difícilment caracteritzable, però que ens pot permetre aproximar-nos al tipus de sistema subjacent que n'és responsable. Sovint el resultat ens mostra que estem davant d'una dinàmica no lineal sorgida d'un sistema de poques dimensions que descriu una trajectòria al voltant d'un cicle límit, caracteritzable mitjançant un conjunt reduït d'equacions diferencials. De vegades, aquesta estructuració en períodes o finestres de variància determinades s'assoleix preferentment damunt de llindars en certes variables o en les relacions entre aquestes. Aquest canvi en l'organització d'estructures es tradueix, sempre, en modificacions de les distribucions de referència, que, en ser degudes a aquesta dinàmica no additiva, resulten més fàcilment detectables que no pas els canvis en les tendències. Un cas clar és la recent controvèrsia sobre l'evolució de la corba de la temperatura planetària en els darrers mil anys i el paper que l'acció humana ha tingut en la seva forma

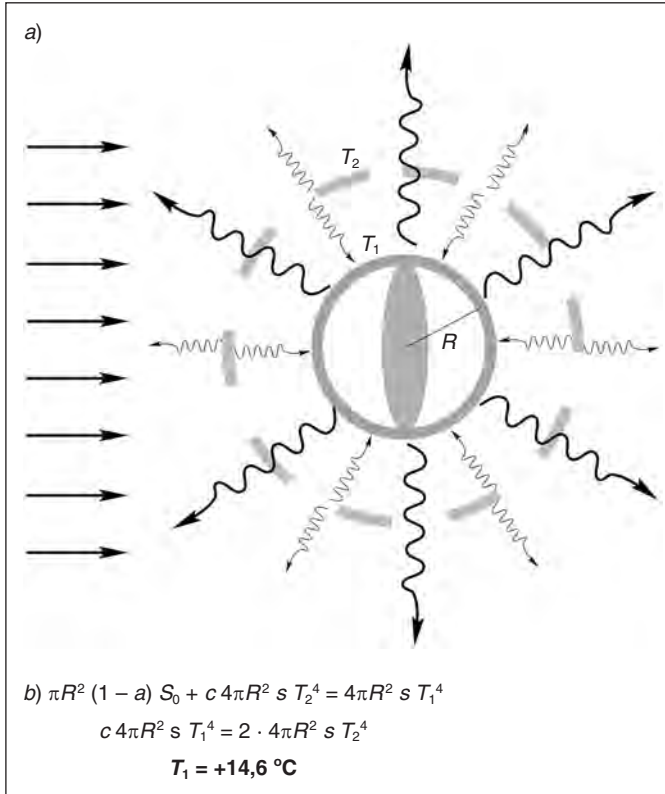


FIGURA 1. a) Representació esquemàtica simplificada del sistema (climàtic) terrestre, amb la Terra com un cos negre en equilibri radiatiu i R = radi terrestre, T_1 = temperatura a la superfície terrestre i T_2 = temperatura sobre la coberta de núvols. La circumferència grisa discontinua vol representar una coberta de núvols discreta simplificada. b) Equacions que descriuen el balanç energètic del sistema senzill mostrat en a) i la temperatura en superfície que en resulta (T_1). L'efecte de retroalimentació dels núvols esdevé essencial en l'assoliment d'aquesta temperatura mitjana de $14,6 \text{ }^\circ\text{C}$.

FONT: Stocker (2003).

d'estic d'hoquei (*hockey stick*). En contraposició a aquesta aproximació, és molt més senzill i alhora robust determinar els canvis en moments d'ordre superior, com ara l'evolució de la variància en la distribució de les temperatures, sobretot en determinades regions del planeta. També, la caracterització de com el clima «impacta» els sistemes biològics esdevé altament complexa i és encara ara en gran part desconeguda, com en el cas, per exemple, de la modulació que exerceix sobre algunes epidèmies tropicals, on manifesta una estructuració en aquesta interfase que funciona segons un tipus de dinàmica similar.

EL SISTEMA CLIMÀTIC COM A SISTEMA DISSIPATIU

220

El sistema climàtic terrestre actua com un sistema dissipatiu, en contraposició als sistemes hamiltonians, és a dir, rebent energia externa que després transforma (internament) en energia de longitud d'ona més llarga, principalment en forma de calor, bé generant estructura bé destruint-la. Els sistemes vius actuen també seguint una pauta similar i les poblacions biològiques, considerades com un ens supraindividual, estructuren l'energia en més o menys paquets singulars i, fins i tot, de vegades, ocasionant explosions anòmales d'estructura i atzar. Un exemple clar en són els brots epidèmics (de malalties infeccioses com ara el còlera, la malària, el dengue o la febre groga, modulades per factors externs, WHO, 2004). En aquest context, el paper regulador o «encebador» que exerceix el clima en les poblacions i els ecosistemes esdevé d'importància cabdal per la seva elevada incidència social i econòmica, tot i que sovint es tracta de manera poc precisa. Això s'esdevé sobretot per una sobresimplificació dels processos bàsics que en regulen la dinàmica.

En aquest intent de caracteritzar adequadament —i per tant també de quantificar— com el clima modula un procés del nostre interès (per exemple, la variable a predir), sovint ens cal quantificar la magnitud d'aquest forçament, com també tenir certesa dels seus efectes, problema aquest que no resulta trivial. Un exemple que ens pot ajudar a entendre aquesta dificultat pot ser la recerca que es duu a terme per tal d'anticipar i predir amb prou temps els brots epidèmics als tròpics de malalties com la malària i el còlera. Abans, però, de cercar constància dels impactes, ens cal sintetitzar en una sèrie temporal el paper exercit pel «clima» de la manera més objectiva possible, tasca que ja des d'un principi pot resultar complexa. Pensem, per exemple, en el càlcul de la temperatura mitjana planetària i en quan sentim a parlar (als mitjans de comunicació) d'increments en la temperatura global de poc més de mig grau en el darrer segle i ho fem estudiant una sola sèrie que ens ha de sintetitzar adequadament els fluxos de calor que tenen lloc a escala terrestre. Fer això per als darrers cent cinquanta o dos-cents anys és una tasca d'una elevada complexitat, a causa, d'una banda, del variable nombre d'estacions de mesura que hi ha o que hi ha hagut i, de l'altra, de l'irregular «recobriments» espacial d'aquestes en les diferents regions del món (per exemple, amb escassa cobertura sobre els deserts, els pols, les muntanyes i sobretot al mar). Pensem, també, en la dificultat afegida d'assignar el «pes» corresponent a cada sèrie instrumental que s'utilitza, ja que el monitoratge no es dona òbviament seguint un patró equidistant en la col·locació d'estacions. No obstant això, i malgrat la gran complexitat que aquest procés de síntesi comporta, la quantitat de dades, estacions i, en les darreres dècades, també mostres amb satèl·lits dels quals disposem, permeten fer aquests càlculs d'una manera acurada (tot i les incerteses associades). Però, si aquesta síntesi és complexa, més ho serà obtenir una sèrie que ens serveixi d'anàleg de la temperatura de tot un

planeta en èpoques històriques, en què no tenim registres instrumentals de base. Com podem constatar adequadament els canvis que s'hi van produir aleshores, si no tenim les estacions de referència? D'on i de quines variables cal obtenir registres de paleoindicadors que ens puguin servir per a fer-ne reconstruccions acurades? En la cerca del sensor terrestre ideal, cal pensar que cada sèrie temporal té unes escales característiques de canvi que es reflecteixen en oscil·lacions o quasiperíodes fonamentals en aquella variable i que són característiques dels processos que estructuraven el clima en aquella regió concreta del planeta, així com de la finestra que aquell subsistema o aquella regió obre de cara a poder registrar fenòmens d'escala planetària. I aquesta finestra, clarament, no és igual a tot arreu. Actualment, la capacitat de mesura de l'ésser humà s'ha incrementat fins a límits insospitats, tot i que, paradoxalment, en alguns llocs (també a la península Ibèrica), el nombre d'estacions instrumentals completes s'ha reduït en els darrers anys en comptes d'incrementar-se. En aquesta direcció, l'estudi de l'evolució del clima planetari requereix que l'obtenció dels registres paleoclimàtics, que ens han de servir per a entendre com ha variat la temperatura en el passat, es vagin a cercar en aquells llocs del planeta que permetin reconstruir millor els fenòmens de gran escala o, al contrari, els d'una regió climàtica determinada (per exemple, els tròpics), si és això darrer en canvi el que se cerca. En aquesta direcció, recentment, ja s'estan obtenint registres de «síntesi» planetària que ens permeten reconstruir els canvis que hi ha hagut a molt alta resolució i amb elevada precisió i d'una manera contínua fins més enllà dels darrers set-cents mil anys (EPICA, 2004). Aquestes variacions reflectides en diferents isòtops es mostren a la figura 2.

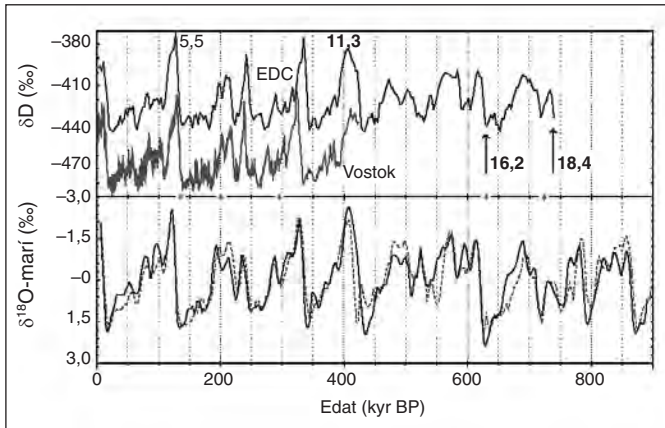


FIGURA 2. Comparació de les reconstruccions obtingudes al Dome C d'EPICA (EDC) amb altres registres paleoclimàtics. A dalt: Evolució del contingut isotòpic delta D dels darrers set-cents mil anys de l'EDC i del sondatge de Vostok. Es mostren, també, alguns estadis MIS. Registres d'oxigen isotòpic marí en dos emplaçaments als efectes comparatius.

FONT: EPICA (2004).

Conceptualment, podem assimilar algunes dinàmiques fonamentals que observem a aquelles que s'expliquen mitjançant un sistema de poques dimensions, explicable segons un conjunt senzill d'equacions diferencials. Però, per a poder fer això, el complex entramat de processos descrits ha de ser explicable per la interacció no lineal d'un sistema de poques dimensions (Lorenz, 1963; Ruelle i Takens, 1971). Aquest fet va significar un canvi de paradigma, ja que implicava deixar de pensar en termes de sistemes lineals amb un nombre infinit de graus de llibertat i que generaven aleatòriament irregularitat. Aquesta idea revolucionària exposada per Lorenz està a la base, també, de la diagnosi i la posterior simulació numèrica que se n'ha derivat per intentar reproduir-ne el comportament. Així, la solució del sistema mitjançant l'especificació

de les condicions inicials defineix una trajectòria o òrbita en l'espai de fases, el qual té una dimensió igual al nombre de variables independents i major que la de l'atractor subjacent. Així, molta de la predictibilitat climàtica, en contraposició a la inestabilitat de les solucions en el domini meteorològic, radica en la natura periòdica o quasiperiòdica de les solucions del sistema estable acotat, que fa que ciclin a l'entorn del que són les mateixes solucions del sistema dinàmic. Abans, però, d'anar més enllà en aquest canvi conceptual, convé posar de



FIGURA 3. *Imatge combinada de l'IR i el visible de la temporada d'huracans de l'any 2004, on es pot veure l'huracà Ivan arribant a les costes de Louisiana als Estats Units —com a huracà ja de grau 4— i un nou huracà, el Jeanne, que ja apareix per la part inferior dreta de la figura prop d'Haití. Cinc dies abans de tocar terra, el 16 de setembre de 2004, les incerteses associades a aquesta no-linealitat tan característica en l'acoblament atmosfera/oceà no permetien preveure quina magnitud tindria l'huracà en arribar a les costes americanes, ni si tocaria terra per la costa est de Florida o, en canvi, entraria pel golf de Mèxic.*

FONT: Imatge de la pàgina web: <http://cimss.ssec.wisc.edu/tropic/archive/2004/storms/ivan/ivan.html>.

manifest els nombrosos exemples de dinàmica no lineal que ens apareixen en la física del clima. Un cas molt clar pot ser la gènesi d'huracans a partir de petites inestabilitats en la columna d'aire als Highlands d'Etiòpia i de com aquestes ones allí generades flueixen cap a l'Atlàntic tropical, únicament en una regió oceànica acotada per la isoterma dels 26°.

D'aquestes ones, només algunes evolucionaran fins a convertir-se en huracans. La resta únicament assoleix categoria de tempesta tropical o es desdibuixa en poc més d'un front, tots en una trajectòria que els duu a les costes del continent americà i responent a una amplificació el fonament dinàmic de la qual encara no s'entén prou bé i a un elevat component estocàstic. Aquesta trajectòria no és predictable més enllà d'uns pocs dies i, pel que respecta a alguns dels processos convectius de més energia que hi ha associats, ni tan sols més enllà d'unes poques hores. De fet, el límit en la predictibilitat depèn de la taxa de creixement de l'error, la qual és inversament proporcional a l'escala temporal i, com que en general les escales temporals de les inestabilitats guarden una relació estreta amb les seves escales espacials, aquelles de més petita escala creixen molt més de pressa que les d'escalas grans. És per això que són menys predictibles que els processos de gran escala. A tall d'exemple, a la figura 3 es mostra com a l'estiu de 2004, l'estació d'huracans va assolir nombres i magnituds força extrems, si els posem en relació amb la mitjana d'anys anteriors. Els factors que determinen que aquestes depressions esdevinguin o no huracans no són coneguts, tot i que es creu que tenen a veure amb la no-linealitat existent en l'acoblament atmosfera/oceà i la vorticitat generada de resultes de la trajectòria per damunt de les masses d'aigua per les quals circula i que mostren variacions en salinitat, temperatura, velocitat i/o moment. No obstant això, el coneixement limitat que encara es té de molts processos essencials en el sistema climàtic i l'òbvia incapacitat de descriure mitjançant equa-

cions deterministes la dinàmica derivada de la interacció no lineal que s'ha mencionat anteriorment fan que en moltes situacions els models climàtics simulin, com a màxim, dinàmiques que són no lineals en les magnituds o taxes de canvi d'aquestes, però no en els processos que les generen i, per tant, tampoc en les seves estructures. Per a minimitzar aquestes limitacions, les prediccions probabilístiques per conjunts provinents de multimodels obren possibilitats noves a l'hora d'explorar tot l'ampli ventall de respostes que es poden generar. A tall d'exemple es mostra, a la figura 4, un exemple d'aquesta limitada capacitat de simular dinàmiques no lineals. Com s'aprecia als gràfics de la figura esmentada, els canvis generats són únicament canvis de magnitud i no pas estructurals, tot i que els diferents experiments estan realitzats sota condicions molt diferents que haurien de mostrar aquestes transicions d'estats.

Al llarg de la història climàtica terrestre i ja en escales temporals més grans, el sistema climàtic mostra uns cicles d'histèresi característics que manifesten comportaments clarament no lineals, dinàmica que es pot apreciar, per exemple, a la mateixa evolució de les sèries de la figura 2 i també en l'evolució de les concentracions atmosfèriques de CO₂ on, malgrat que en ambdues les ciclicitats resulten evidents, les fases d'increment i disminució són clarament asimètriques. Aquest tipus de respostes observades podrien ser el resultat de fenòmens de lliandar, conceptes que s'han utilitzat per a descriure transicions entre diferents estats «estables», per exemple a través d'alteracions en la circulació termohalina. La resposta ocasionada per aquestes transicions climàtiques també mostra unes dinàmiques clarament asimètriques i, per tant, no lineals, sovint d'evolució cap a altres estats temporalment estables i clarament en funció de la proximitat o no del sistema climàtic a una bifurcació. Una resposta no lineal similar també es manifesta sovint en el cas de sistemes que experimenten

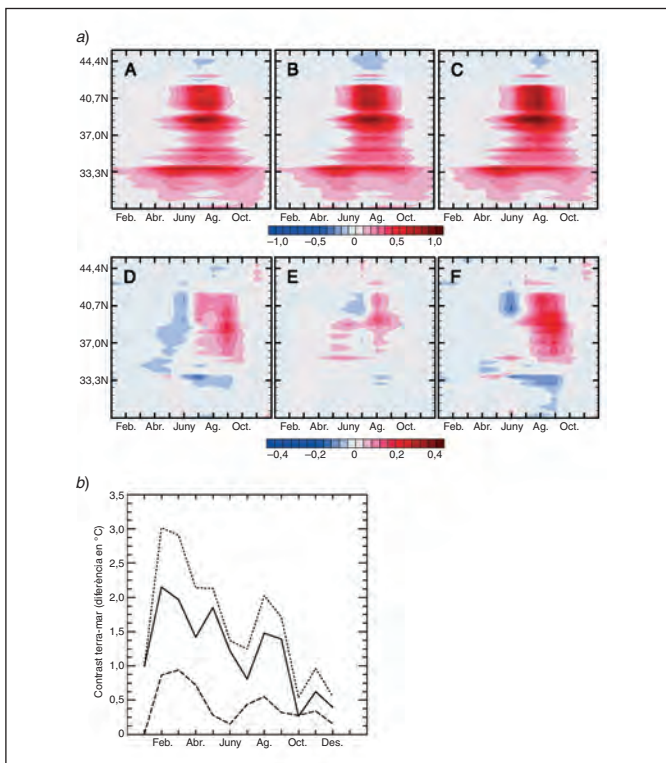


FIGURA 4. Contrast de temperatura i anomalies entre la terra i l'oceà reals i simulades amb models amb condicions diferents (2CO₂; 2CO₂_VEG; 2CO₂_CONTROL; 2CO₂_VEG_2CO₂; 2CO₂_VEG_CONTROL). a) Anomalies en l'evolució mitjana del remolí per al wind-stress al corrent de Califòrnia. A) Gir mitjà zonal per a la situació control. B) Gir mitjà zonal per a condicions de 2CO₂. C) Gir mitjà zonal per al cas de 2CO₂_VEG (amb efecte de la vegetació). D) Anomalies en el gir mitjà zonal per al cas de 2CO₂_CONTROL. E) Anomalies calculades com a 2CO₂_VEG_2CO₂. F) Anomalies calculades com a 2CO₂_VEG_CONTROL. b) Ídem que a, però per al cicle anual d'anomalies en el contrast tèrmic terra-mar calculades com a 2CO₂_CONTROL (línia contínua), 2CO₂_VEG_2CO₂ (línia discontinúua) i 2CO₂_VEG_CONTROL (línia de punts), respectivament.

FONT: Diffenbaugh et al. (2004).

un forçament climàtic, tant socials com econòmics, i per exemple resulta evident en el cas d'epidèmies, on el forçament extern de vegades pot ser un clar determinant de brots epidèmics d'incidència anormalment gran (Pascual *et al.*, 2000; Rodó *et al.*, 2002; Bouma i Dye, 1997).

Aquest canvi conceptual cap a un sistema regit per processos no lineals no va ser trivial, ja que la «linealitat» va dominar el pensament dels climatòlegs en els darrers dos-cents anys. No va ser fins a la formulació per Lorenz, al final de la dècada dels seixanta, de les seves teories que es va produir un canvi radical en la manera de veure els processos que governen els sistemes físics. Aquest canvi de paradigma té el seu reflex en l'àmbit de la diagnosi a l'hora de caracteritzar els processos físics, ja que, per exemple, en el cas lineal aquests es tracten com en el cas senzill en el qual tenim una equació diferencial lineal ordinària amb un forçament aleatori. En notació discreta seria:

$$X(t+1) = \sum_{j=1}^M a_j X(t-M+j) + \xi(t) \quad [1]$$

on els coeficients a_j determinen les solucions i el forçament aleatori $\xi(t)$ s'assumeix com a soroll blanc, Gaussia i per tant no correlacionat en el temps i amb variància constant i igual a 1. Aquesta aproximació implica l'assumpció que els processos són autoregressius i d'ordre M . El teorema de Bochner-Khinchin-Wiener (Box i Jenkins, 1970), d'altra banda, ens permet relacionar el domini temporal i el freqüencial a través de la transformada de Fourier i això entronca amb el fet que el comportament més regular i més previsible d'una sèrie temporal és que sigui periòdica. Així, es va passar a considerar que el comportament irregular d'una sèrie temporal univariant podia ser generat per un sistema que podia ser determi-

nístic. Seguint amb la mateixa argumentació, doncs, ens interessa veure si el sistema és explicable mitjançant un nombre reduït o acotat de graus de llibertat, del qual podem inferir, per tant, la dimensió del conjunt o sistema i l'existència d'una estructura fractal a la base d'aquesta irregularitat observada en la sèrie. Així al final podem utilitzar diferents aproximacions per tal de reconstruir les equacions que el governen. En comptes de [1], tenim ara que la nostra sèrie de dades en el fons és la solució d'un sistema d'equacions diferencials ordinàries no lineals d'ordre s :

$$X^{(s)} = G(X^{(s-1)}, \dots, X) \quad [2]$$

La funció G és no lineal i la solució del sistema en el cas de comportaments periòdics passa a l'entorn de l'atractor, descrivint-ne òrbites a l'entorn. Tot i que no és possible reconstruir-lo amb la reduïda longitud de les sèries de dades, sí que es poden aproximar els cicles límits que es descriuen. Per exemple, en el cas de l'oceà i pel que fa a la predictibilitat que conté, podem pensar que hi ha regions generadores de «periodicitats», que, a més, són o poden ser estables per un interval més o menys prolongat d'anys i que sovint poden abastar regions —per exemple oceàniques— més o menys extenses. De fet, els episodis en els quals la trajectòria del sistema circula prop d'un cicle límit tenen com a resultat segments periòdics a la sèrie temporal de dades i, en conseqüència, també un pic a l'espectre. Per tal d'aproximar-nos més a la natura caòtica de l'atmosfera, en el desenvolupament de sistemes de predicció numèrica, s'ha evolucionat des de l'elaboració de prediccions purament deterministes fins al desenvolupament de prediccions per conjunts que són generats a partir de petits canvis en les condicions inicials i també en les especificacions dels models utilitzats, per tal de reflectir d'una manera més realista les incerteses que hi ha en el coneixement que tenim del siste-

ma climàtic. Així doncs, dues característiques fonamentals que també ens guiaran al llarg de l'exposició que segueix són la no-linealitat i l'origen de la irregularitat que es manifesta. Un altre tema interessant que no cal oblidar tampoc i que resulta cabdal per a entendre l'origen d'aquesta predictibilitat climàtica a escales d'estacionals a interanuals (i més enllà del límit teòric de les dues setmanes aproximadament definit pel domini meteorològic segons el model de Lorenz), és la reducció en la capacitat de predicció dels sistemes sinòptics de menor dimensió, respecte d'aquelles ones planetàries de més gran abast. Així, els fenòmens de mesoscala, com els fronts o sistemes convectius, són intrínsecament predictibles per a períodes més curts; per exemple, en el cas de precipitacions en tempestes puntuals, aquest temps és de poc més d'una hora, llevat que l'activitat convectiva sigui generada o forçada per fenòmens d'escala espacial més gran, o també en el cas de fenòmens de mesoscala que estan generats per la interacció de fenòmens sinòptics, per exemple, amb la topografia d'una zona concreta. La predictibilitat climàtica (per exemple, d'escales estacionals a pocs anys) radica essencialment en què passem del domini d'un sistema regit per la dinàmica estocàstica a un altre domini bàsicament sota el govern de l'oceà (i en menor mesura de la biosfera). Aquest fet també va lligat a les diferències estructurals i de composició dels diferents medis i la molt variable capacitat d'emmagatzemar calor, i per tant memòria, en els diferents compartiments (ja sia en fondària o en alçària). Resulta fascinant, de la mateixa manera, pensar que la memòria climàtica que «entra» als oceans en forma d'energia es dissipa més o menys brutalment o suauement i a causa essencialment de processos de ciclogènesi que fan aflorar aquesta memòria (també es donen, d'altra banda, fenòmens d'advecció en contraposició a la persistència). Un exemple d'aquesta predictibilitat es mostra a la figura 5, on es representa la primera funció empírica ortogonal (o EOF) es-

tandarditzada de les diferències de temperatura superficial de l'aigua de mar (d'ara endavant SST) del període 1950-2000 entre primaveres successives (entesa com el compòsit dels mesos de març a maig) i que explica un 14,5 % de la variància total. La figura deixa entreveure el pes de l'ENSO (El Niño - Southern Oscillation) en aquesta estructuració oceànica superficial bàsicament a latituds baixes (fenomen que domina la variància durant els mesos d'hivern), tot i que —com es veu a la imatge— també explica una quantitat important del balanç tèrmic a latituds mitjanes. De rellevància per al nostre clima són els processos que s'organitzen a l'entorn de l'Atlàntic tropical nord i que, en aquesta estació de l'any, prenen allí un paper preponderant —com també a l'Índic—, mentre que el paper dominant del Pacífic tropical posat de manifest en el primer EOF d'hivern passa ara a ser secundari en termes de

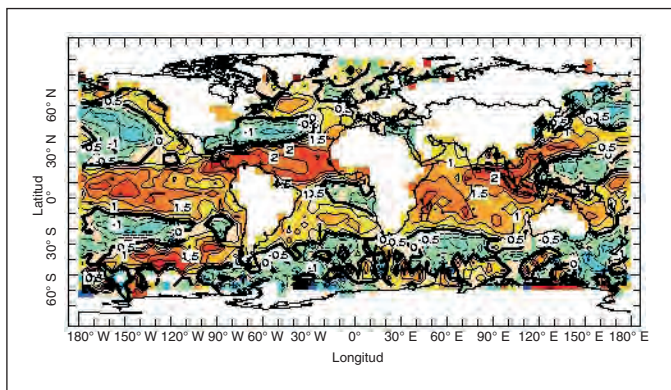


FIGURA 5. Mesura de la «memòria» climàtica oceànica durant els mesos de primavera (de març a maig) obtinguda com el primer vector propi normalitzat de les diferències de temperatures superficials de l'aigua de mar entre anys successius per al període 1950-2000. Aquesta configuració explica un 14,5 % de la variància total. Els valors indicats estan expressats en graus.

FONT: Elaboració pròpia.

magnitud. Aquesta memòria oceànica a l'Atlàntic, que aflora en èpoques d'elevada ciclogènesi i que l'estructura mitjançant l'intercanvi net de calor amb l'atmosfera, posteriorment, es constitueix en una font de predictibilitat climàtica poc estudiada a casa nostra, però que pot presentar un gran potencial.

L'origen d'aquest emmagatzemament de calor a les capes superficials de l'oceà en aquestes regions tropicals i la semblança del patró global amb el que es dona quan hi ha un episodi ENSO (vegeu la figura 6 per a l'episodi càlid de 1987), s'explica mitjançant l'estreta relació que hi ha entre l'atmosfera i l'oceà i que, en aquest cas, activa la circulació atmosfèrica de gran escala als tròpics i a les latituds mitjanes, en alguns casos impactant fins i tot abans que hi hagi totalment establerta una fase càlida de l'ENSO.

232

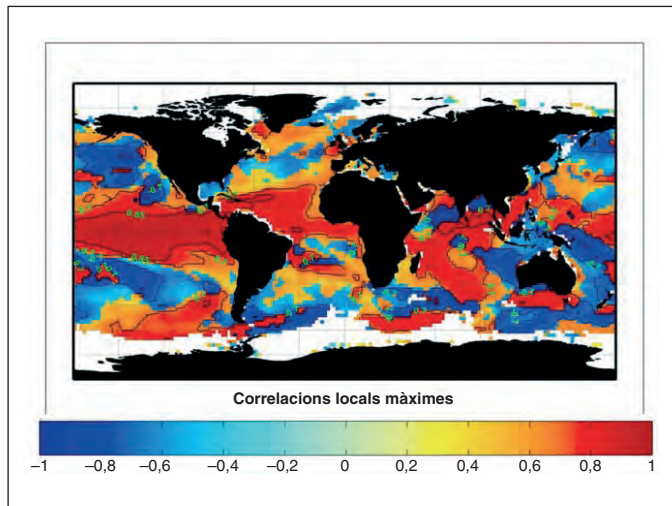
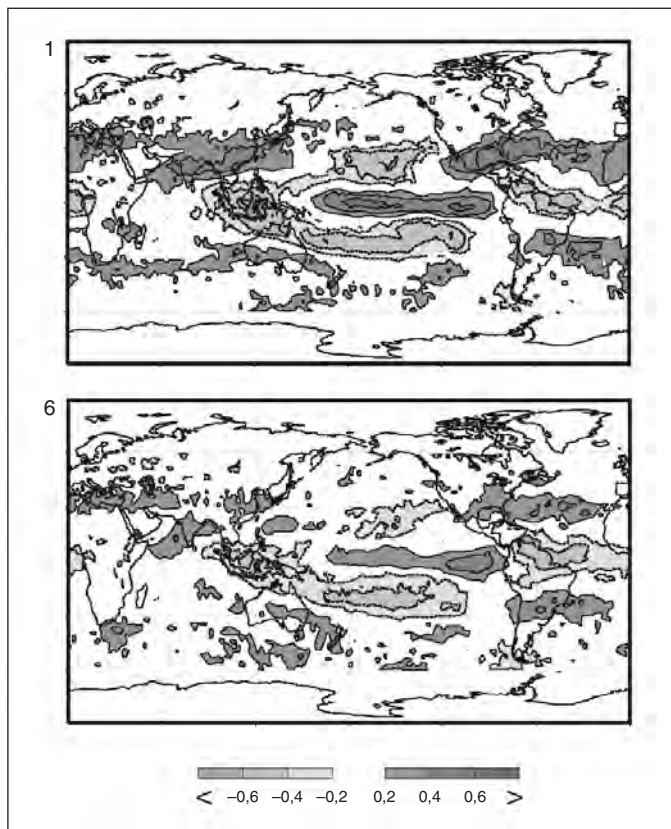


FIGURA 6. Mapa SDC global de correlacions locals màximes per a l'episodi càlid de l'ENSO de 1987.

FONT: Rodríguez-Arias i Rodó, dades no publicades.

A les latituds mitjanes, a diferència dels tròpics, el forçament atmosfèric sobre l'oceà és molt important i condiciona notablement el balanç de calor en aquestes regions i, en conseqüència, també les situacions sinòptiques que s'hi des-



233

FIGURA 7. Camps de correlació entre l'ENSO i la humitat relativa a l'alta troposfera un i sis mesos més tard. Els contorns indiquen correlacions significatives com a mínim per $p < 0,001$.

FONT: Rodó (2001).

envolupen. Aquest fet es fa palès a la figura 7, per al cas de l'Atlàntic i també del Pacífic nord i pot arribar a afectar el balanç net de calor a la Mediterrània, bé directament a través de la modulació de la cel·la de Hadley local (Rodó, 2001) o bé indirectament, condicionant les capes superficials d'extenses zones oceàniques a l'Atlàntic, que posteriorment afectaran el desenvolupament de sistemes frontals i les seves trajectòries i també l'estabilitat de certes situacions anticiclòniques.

Aquesta memòria climàtica, que resideix bàsicament als primers 50 m de l'oceà a les escales que estem considerant aquí, la podem utilitzar per a forçar un model atmosfèric de complexitat intermèdia (Rodó i Rodríguez-Arias, 2004; Cash *et al.*, 2008) constrenyit únicament en algunes d'aquestes zones oceàniques molt sensibles. Aquest procés ens permet simular algunes estructures atmosfèriques que ens són noves i que únicament havíem pogut observar mitjançant noves tècniques de diagnosi local. Els guanys que s'assoleixen en predictibilitat potencial amb aquesta diferent aproximació reproduïxen ara les estructures reals, però no encara les magnituds d'aquests acoblaments. En aquelles zones de la figura 7 —i també en altres variables—, on es concentra la variància a les escales interanuals d'interès, hi ha, doncs, una capacitat predictiva lligada a la quantitat de calor emmagatzemada a les capes oceàniques superficials i que té uns temps de correlació característics i diferenciats en cada àrea, però que ens poden permetre guanys de predictibilitat local de l'ordre d'uns mesos i, en algun cas, de més d'un any. Explotar aquest potencial predictiu encara no està a l'abast d'una manera operativa, però les expectatives que hi ha en algunes regions haurien de possibilitar que aquesta opció fos una realitat a curt termini o mitjà.

De tota manera, per la natura no estacionària i canviant que manifesten aquest tipus de comportaments, sobretot si ens fixem en períodes de temps llargs, les tècniques ha-

bituals de diagnosi —és a dir, aquelles que assumeixen una constància temporal en els senyals o un filtre preestablert—, sovint no recullen adequadament la seva contribució a una sèrie temporal. Aquestes periodicitats o finestres per on circula preferentment l'energia tenen, en alguns casos, una estructuració molt clara a escala temporal; per exemple, en el domini paleoclimàtic podem pensar en els cicles de Milankovitch associats a forçaments orbitals (a l'entorn de 100.000 anys, 43.000 anys, 21.000-23.000 anys i el subharmònic de semi-precessió d'11.000 anys, entre d'altres) (figura 8). Molt més a prop de l'escala humana, a escala interanual, aquestes finestres també estan força definides, si més no aquelles lligades a variacions en el rang biennal i quadriennal, en els quals el referent més important són les oscil·lacions quasibiennals i l'ENSO. Especialment i com que l'actual conformació de la superfície terrestre en terres emergides i masses d'aigua ho condiciona així, hi ha regions on l'energia flueix amb més facilitat en els acoblaments atmosfera/oceà —i per les quals es transfereix preferentment l'energia a l'atmosfera des de latituds baixes. El sistema climàtic, com dèiem, és assimilable a un sistema que opera segons les premisses dels sistemes dissipatius. Al llarg de la història (geològica) terrestre, la forma com s'ha dissipat aquesta energia externa ha anat variant, segons un «equilibri» dibuixat per la mateixa topografia i per com aquesta ha anat canviant la relació entre la distribució i la forma tant dels continents com de la batimetria dels fons oceànics. És precisament aquesta canviant distribució de la «rugositat» terrestre, del balanç i la variable —a escala geològica— conformació en terres emergides i en masses oceàniques la que ha modulats, juntament amb la vida que s'hi ha desenvolupat, la distribució específica de tipologies climàtiques terrestres. (Menció a part, és clar, i en escales diferents es mereixerien els cicles de Milankovitch lligats a variacions orbitals, etc.)

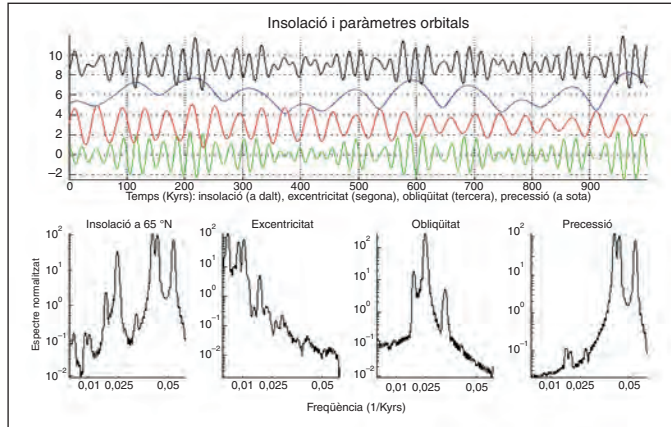


FIGURA 8. A dalt: evolució de la insolació a 65°N i dels paràmetres orbitals (excentricitat, blau; obliquïtat, vermell, i precessió, verd) per al darrer milió d'anys. A sota: distribució de la variància en els espectres de les variables mostrades al panel superior. Noteu com les diferents «finestres» per les quals es distribueix l'energia corresponen a les escales característiques dels paràmetres orbitals.

FONT: Redibuixat a partir de diverses fonts.

EL MODEL DEL PINBALL

Aquesta distribució de les *finestres* per on es dissipa l'energia preferentment també la veiem reflectida a escala espacial en observar el comportament mitjà de certes variables que indiquen processos, per exemple, d'acoblament clars o de forta interacció de subsistemes climàtics. La representació d'aquestes regions de transició energètica preferent —clarament definides en l'actual etapa geològica, però que han anat variant en el decurs de l'evolució planetària i en resposta als canvis en les distribucions de masses— pot ser aproximada, com també el seu funcionament, mitjançant un anàleg senzill: el model del *pinball*. Amb aquesta analogia ens podem imaginar que la

bola metàl·lica circula preferentment per unes zones de l'àrea de joc i que té una probabilitat superior de caure per uns forats que per uns altres, probabilitat que, d'altra banda, és funció de l'energia cinètica de la bola en ser llançada (figura 9a). Aquesta probabilitat varia d'una manera clarament no lineal en funció també de la inclinació del tauler de joc, situació que afavoreix que la bola vagi a caure sovint en zones concretes, per on la mateixa conformació del tauler ha definit unes àrees o uns forats preferents de transició. També s'afavoreix el trànsit entre comportaments lineals i no lineals, per exemple en incrementar la inclinació o accelerar el flux. La distribució climatològica en un any concret de centres actius és assimilable a aquest model simplificat del *pinball* (figura 9b). La major acceleració en els fluxos entre compartiments, fruit potser d'una major inclinació del taulell, fa pensar en la proximitat d'una zona de transició, a l'estil de quan es fa falta en una partida i apareix la forma «TILT» i la màquina temporalment no respon a les nostres indicacions. Potser també aleshores, portant l'analogia al límit, el paper de l'home per revertir la situació és transitòriament inútil. La constatació, per exemple, d'un pes més gran dels darrers anys en la variància total de la distribució de probabilitats o de canvis en la forma de les distribucions de les dades pot fer pensar d'una manera més clara en l'existència real d'aquests canvis, sense haver d'esperar les diverses dècades preceptives que calen per als canvis en les mitjanes.

Pensem, per exemple, en la situació geogràfica dels centres de pressió, que a escala planetària segueixen una conformació clarament determinada per la interacció del forçament extrínsec i la redistribució en l'espai i el temps d'aquesta energia segons l'estructura de la superfície terrestre i en funció de les retroaccions i els retards que es produeixen, per exemple en el trànsit entre els oceans i la resta de compartiments (figura 9c) i per la particular posició en els eixos de latitud i longi-

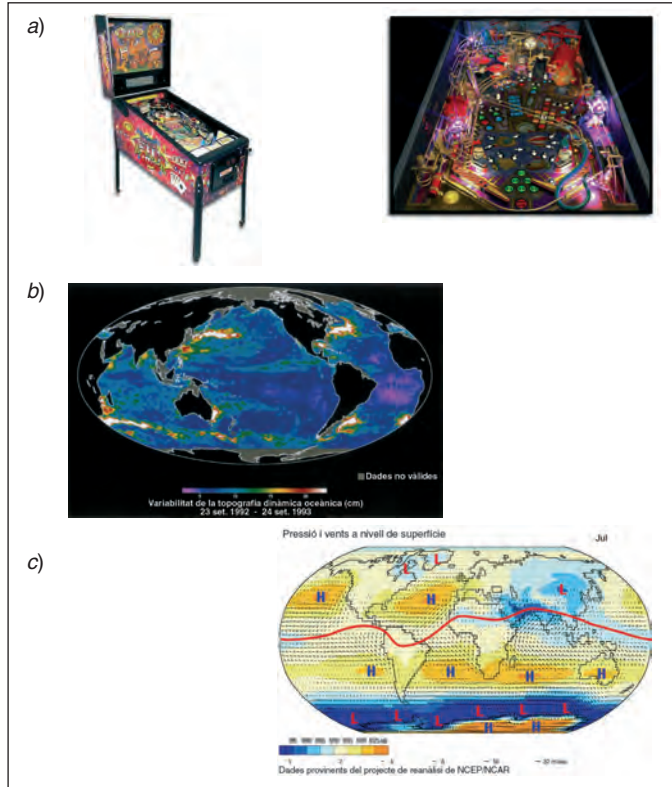


FIGURA 9. a) Model de pinball que ens permet un anàleg senzill dels fluxos d'energia entre sistemes. b) Canvis mitjans en la topografia dinàmica oceànica (TDO) entre final de 1992 i de 1993 (els colors reflecteixen una escala en cm). Es poden apreciar aquelles regions oceàniques on hi ha elevacions extraordinàries en aquestes mesures dinàmiques i que representarien les «finestres» (vegeu text). c) Climatologia de la pressió a nivell del mar (SLP) i dels vents en superfície en el mes de juliol i per a l'interval 1959-1997 a partir de dades de les reanàlisis de NCEP/NCAR. Noteu la relació que hi ha entre la localització dels màxims en TDO i la ulterior localització en els centres d'altres pressions (els colors indiquen les diferències de pressió atmosfèrica; H, els sistemes d'altres pressions, i la mida de les fletxes, la velocitat dels vents).

FONT: Elaboració pròpia.

tud terrestres. Aquesta darrera localització determina la molt important contribució de la força de Coriolis a l'estructuració final, sobretot pel que fa a latituds tropicals i mitjanes.

És precisament d'acord amb el que resulta d'aquesta particular manera de distribuir l'energia que aquells canvis que s'introdueixen al sistema o els que es preveu que s'esdevinguin segueixen també una representació no lineal en aquest particular tauler de joc. És a dir, en un context de canvi climàtic, resulta evident que aquestes regions recullen d'una manera preferent les constatacions fefficients que el sistema climàtic en el seu conjunt està canviant i de com s'estan produint aquests canvis. Aquest procés de diagnosi sempre és molt més precís que el difícil i sovint no prou objectivable esrutini dels canvis en les tendències o els valors mitjans d'una variable global, com és ara la temperatura de tot el planeta. L'existència de controvèrsies inescotables sobre la correcta identificació de canvis en moments de primer ordre de determinades variables de gran interès públic, com ara la temperatura planetària, posa de manifest la validesa que pot tenir aquest tipus diferent d'aproximacions. Així, enfront de disputes de l'ordre de dècimes de grau, és molt més robust avaluar com ha canviat la variància de les nostres dades, indicador clar dels processos que la generen (Rodó *et al.*, 2002). També per exemple, els canvis en la forma de la distribució de probabilitats de la variable d'interès són mesures molt més robustes i que, a més, ens acosten al grau d'estabilitat de la dinàmica del sistema subjacent. I és precisament en aquestes regions geogràfiques diferenciades en l'eix d'escala d'espai/temps, veritables laboratoris de canvis planetaris (o regionals en alguns casos), on amb aproximacions diverses podem quantificar-ne els fluxos i on es posa de manifest la no-linealitat i la no-estacionarietat en aquestes relacions entre medis diferents. Un cas molt clar de la necessitat d'alternatives sorgeix, per exemple, de l'estudi de l'evolució de la temperatura planetària mitjana

en els darrers dos mil anys (figura 10) i de la seva forma semblant a la d'un estic d'hoquei. En un estudi seminal en aquest àmbit temàtic, Mann *et al.* (1998) van establir que l'evolució de les temperatures planetàries mostrava grans canvis en la seva tendència, coincidents amb l'acció antròpica i respecte al que havia estat l'evolució climàtica en els dos mil anys anteriors. Fins i tot es podia arribar a pensar que, com a resultat d'aquesta acció antròpica cap a l'escalfament, es revertia el que podria pensar-se que era un cert grau de refredament global anterior. Les reconstruccions mostren, doncs, una dràstica tendència ascendent en el darrer segle.

Molt recentment, l'estudi dels registres climàtics oceànics i terrestres, de baixa resolució en combinació amb els registres d'anells dels arbres i dels *boreholes* ha permès de constatar com les reconstruccions esmentades no havien recollit oscil·lacions de base de molt gran període i com, en conseqüència, el grau d'increment en les temperatures ocorregut en el darrer interval històric sembla, doncs, no ser tan important com es pensava. Sense que aquestes noves proves indiquin que hem de menystenir, ni de bon tros, el paper de l'home en els canvis planetaris que estem mesurant —paper ja fora de tot dubte—, aquests nous resultats permeten, no obstant això, posar-los en un context nou de canvis, que ja té en compte aquells de llarg període que semblen ocórrer d'una manera natural en el clima terrestre.

LA SIGNATURA DEL CLIMA SOBRE LES MALALTIES INFECCIOSES ALS TRÒPICS

El clima influeix sobre la dinàmica d'una diversitat d'epidèmies a través del seu impacte —sovint difós—, en «l'ambient» adjacent a la malaltia, i les que tenen un efecte més reconegut són majoritàriament malalties infeccioses d'àmbit tropical.

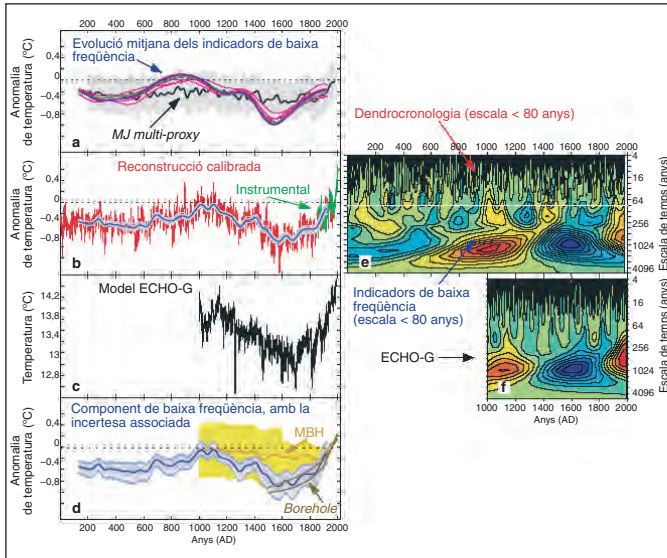


FIGURA 10. *Estimacions de les variacions en les temperatures a l'hemisferi nord.* a) *Reconstruccions prèries fetes per Mann i Jones (línia negra), amb l'envolupant corresponent a una incertesa associada de $\pm 2SD$. Les altres línies provenen d'allistats fets sobre altres reconstruccions.* b) *Reconstrucció amb multiproxies o multiindicadors feta per Moberg et al. (2005). S'assenyala també la reconstrucció a partir del registre instrumental.* c) *Model ECHO-G forçat que es va utilitzar en la simulació.* d) *Comparació de la baixa freqüència recollida en la nova reconstrucció (en blau) i dels boreholes amb la de Mann et al. (1998) (MBH en groc).* e) i f) *mostren els wavelets de b i c, respectivament.*

FONT: Moberg et al. (2005).

No obstant això, la dinàmica pròpia de la malaltia que es veu afectada per l'entorn modula i integra aquests forçats externs, i no és sempre igualment sensible. De vegades, per exemple, tenim condicions favorables a la propagació, quan hi ha un *pool* elevat d'individus susceptibles i la transmissibilitat, a més, és elevada, si tenim un forçat ambiental extern en la ma-

teixa direcció, es pot produir un nou brot epidèmic que sobrepassa els límits de la normalitat. El cas oposat també és cert i, així, no sempre que hi hagi condicions ambientals i climàtiques favorables tindrem un brot epidèmic, llevat que la malaltia estigui igualment preconditionada (per exemple, no hi haurà un nou brot amb un reduït nombre d'individus susceptibles a la població, com ocorre just després d'una gran epidèmia). El forçament per factors externs, en darrer terme, altera el medi del patogen o del receptor, o la interacció entre ambdós, per exemple facilitant-la encara que sigui temporalment. També els factors lligats no sols a paràmetres demogràfics, sinó aquells de l'àmbit més social o fins i tot econòmic, poden tenir una notable importància a l'hora d'ajudar a entendre com evolucionarà un brot després d'iniciat (figura 11).

En un principi, els estudis pioners van centrar-se en unes poques variables meteorològiques, per exemple, canvis en les temperatures i precipitacions, però, en fer això, es va obviar la dinàmica de processos de gran escala característics del sistema climàtic. En el cas del còlera al subcontinent indi, la cerca d'explicacions ambientals i climàtiques va començar fa ja més de cent anys, per part dels metges militars britànics a Bengala i d'altres províncies de l'antiga colònia britànica de l'Índia. La variació del còlera en aquestes àrees exhibia un ric ventall de patrons dinàmics diferents, tant a l'escala estacional com a l'interanual. També se solien donar, i encara ara es donen, variacions en el moment d'inici en epidèmies diferents, decalatge que podia diferir de l'ordre de mesos i fins i tot un any i també en l'amplitud que assolien aquestes epidèmies. Aquesta variabilitat interanual tan pronunciada ja va ser descrita en els primers registres que es tenen, amb uns períodes dominants que oscil·laven entre tres i sis anys, canviant en funció del lloc i del mètode d'anàlisi (Bellew, 1885; Russell, 1925-1926). Una notable modulació interanual es pot apreciar clarament també en una sèrie recent de còlera provinent



FIGURA 11. Grup de persones rentant-se a Dacca, Bangladesh.

d'un monitoratge efectuat a Bangladesh (Pascual *et al.*, 2000; Rodó *et al.*, 2002). No obstant això, no hi ha encara una explicació clara sobre l'origen dels patrons estacionals (i en alguns casos també sobre els interanuals) a zones endèmiques (Shears, 1994), patrons que poden variar en funció de la localització geogràfica. El desconeixement real dels factors responsables d'aquestes variacions a escales diferents necessàriament obliga que el model que cal ajustar per tal d'explicar-ne l'evolució tingui tan poques constriccions com sigui possible. Així, les aproximacions, per exemple en el cas del còlera, han de possibilitar copsar la no-linealitat de la dinàmica epidèmica (especialment en la transmissió) i la possibilitat que hi hagi llindars ambientals. Típicament la transmissió entre els *pools* de susceptibles i d'infectats en una població és densodependent i aquesta no-linealitat resultant esdevé un tret caracterís-

tic també en la dinàmica d'altres malalties (Finkenstadt *et al.*, 1998; Ellner *et al.*, 1998)

Una aproximació recentment utilitzada, a la frontera entre els sistemes dinàmics i l'anàlisi no lineal de sèries temporals, va consistir a utilitzar un model de sèries temporals que era no lineal, no paramètric i autoregressiu (Ellner *et al.*, 1998). Va ser utilitzada primerament per a modelar malalties infantils i més recentment, també, com en el cas del còlera, per a malalties amb un forçament extern (Pascual *et al.*, 2000). Així, els models emprats d'aquest tipus expliquen entre un 70 % i un 80 % de la variabilitat total amb un nombre reduït de variables independents. La formulació utilitzada consisteix a modelar la dinàmica d'una variable d'interès, Y_t , per exemple, la incidència o mortalitat de còlera, amb un model no lineal i autoregressiu del tipus següent:

244

$$Y_{t+T_p} = f(Y_t, Y_{t-\tau}, Y_{t-2\tau}, \dots, Y_{t-(d-1)\tau}, E_{t-\tau_f}) + e_t$$

on T_p és un temps de predicció, f és una funció no lineal, τ és un lag, d és el nombre de coordenades de retard, $E_{t-\tau_f}$ és una covariable ambiental a desfasament τ_f i e_t són perturbacions aleatòries de mitjana nul·la. Així, com a trets característics cal destacar que la funció f no està especificada *a priori*, sinó que la forma de la funció és definida per les dades mateixes (tècnicament és no paramètrica), aspecte aquest important quan hi ha poca informació de base sobre el procés a estudiar. En segon lloc, el model utilitza variables de retard, que són anàlogues a aquells factors que no coneixem. Aquesta aproximació sorgeix de la teoria de sistemes dinàmics (es coneix com a reconstrucció de l'atractor [Takens, 1981]) i de quan no es coneixen (i per tant tampoc no s'han mesurat), totes les variables que interactuen en un sistema. Així, el teorema de Takens estableix que podem utilitzar coordenades temporals desfasades com a variables anàlogues d'aquelles variables d'un siste-

ma que no controlem. I, finalment, el model incorpora un terme que possibilita el forçament des d'una variable externa, $E_{t-\tau_f}$, durant un interval determinat —seleccionat *a posteriori* partint dels successius ajustos a les dades mateixes. Aquesta variable externa, o vector de variables externes, està definida de manera que l'estat del sistema en cada moment no altera el de la variable o les variables externes. Aquesta inclusió d'una variable addicional en l'equació anterior es basa en una extensió feta per Casdagli (1992) del teorema de Takens.

La implementació d'aquesta metodologia es pot fer seguitament, mitjançant tècniques diferents, que inclouen predictors locals, ajustos polinomials, regressió difusa i també xarxes neurals.

L'aplicació de xarxes neurals amb la tècnica de *feed-forward* ha permès de reconstruir la dinàmica recent del còlera a Bangladesh i poder entendre, així, els papers relatius que tenen els factors intrínsecs respecte dels extrínsecs, ja que l'aproximació s'ha fet testant a la vegada la significació de l'addició d'un d'ells respecte de l'altre i a l'inrevés. Aquesta nova aproximació permet constatar que, per modelar la dinàmica d'aquesta malaltia correctament, ens cal tant incorporar la dinàmica extrínseca, a través de la modulació climàtica interanual (l'ENSO, en aquest cas, com a modulador interanual principal a escala planetària), com incorporar la densodependència dels valors de la població immediatament anteriors (com a mínim de dos mesos abans). El resultat de l'aproximació es mostra a la figura 12, on s'explica un 67 % de la variància total i hi ha un guany en la predictibilitat de prop de dos mesos.

El procés d'ajust d'aquesta equació també implica l'elecció dels paràmetres que controlen la complexitat del model (per exemple, la dimensió envolupant d o el nombre de nusos o neurones k). Aleshores, l'elecció del millor model s'ha de basar en un criteri de validació creuada que cerca el millor mo-

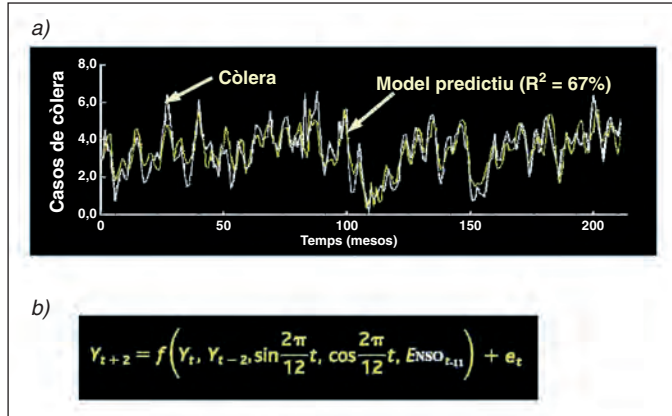


FIGURA 12. a) Incidència de casos de còlera a Dacca, Bangladesh entre 1980 i 2000 (en blanc). La línia groga mostra l'ajust obtingut amb el model explicat al text, que permet una anticipació de dos mesos per al nivell de variabilitat explicat. b) Equació que mostra els termes seleccionats per al model, on destaquen les dues coordenades poblacionals de retard, el «rellotge estacional» i el terme extrínsec, en aquest cas l'ENSO, onze mesos abans.

FONT: Pascual *et al.* (2000).

del en termes de precisió, però alhora també penalitza la sobredimensió excessiva quant al nombre de paràmetres, en relació amb el nombre total de punts de la sèrie.

Així doncs, els resultats mostrats més amunt per al còlera mostren que hi ha una relació no lineal entre l'ENSO —el modulador climàtic de més abast espacial que existeix—, i el còlera, i també cal conèixer els valors previs corresponents al nombre de susceptibles per a la malaltia en qüestió (Pascual *et al.*, 2000). Aquest fet ressalta la importància d'entendre el joc que es dona entre el que aporten els factors externs i els interns en la regulació de la dinàmica global d'una malaltia d'aquest tipus.

Un pas endavant en aquest camí per a acotar la malal-

tia consisteix a fornir un model dinàmic que ens permeti anticipar-nos a la seva incidència partint de paràmetres mesurables propis d'una dinàmica epidèmica. Així, una manera simple de modelar una malaltia que presenta immunitat (parcial) és mitjançant un model SIRS per compartiments, separant la població en classes segons que els individus siguin «susceptibles», «infectats» o «recuperats» o immunes, amb la posterior pèrdua de la immunitat i el retorn a la classe dels susceptibles o la desaparició de la població. (La versió escolàstica d'aquest model mostra oscil·lacions sostingudes en la incidència, amb un període que és funció de la història natural de la mateixa infecció i de la taxa a la qual entren els susceptibles a la població, però no de la mida d'aquesta.) Un model més senzill, el SIS, no defineix un compartiment d'individus immunes i no acostuma a provocar oscil·lacions en la seva incidència, ja que aquestes sorgeixen quan hi ha períodes d'immunitat o de morts, que extreuen els individus de la població.

Un paràmetre molt important a l'hora de definir un bon model epidèmic és el valor del nombre reproductiu bàsic d'una infecció (R_0), que és el nombre mitjà d'infeccions secundàries causades per un individu infectat en una població formada completament per susceptibles. Aquest és un paràmetre clau per a determinar correctament la propagació de la malaltia i la seva persistència. És interessant, d'altra banda, en el cas del forçament climàtic, poder diferenciar entre la sincronització espacial que es produeix en les poblacions d'infectats a causa purament del contacte entre individus, d'aquella altra on la font de sincronització és externa i, per tant, funció de l'ambient. En tots dos casos es produeix una sincronització tant de la fase com del període d'oscil·lació de la malaltia. Aquesta sincronització es pot produir, també, un cop traspassat un llindar —ambiental o lligat a la població— en el valor d'una variable reguladora. Per damunt d'aquest llindar, per exemple facilitat gràcies al forçat extrínsec, els brots epidèmics podrien

produir-se de manera aleatòria, ja que a tot arreu seria «igualment» probable que aquest tingués lloc o, en canvi, podria succeir que, tot i existir aquesta facilitació externa, l'ambient proper a la malaltia «organitzés» els brots segons estructures de contagi fàcilment identificables.

BIBLIOGRAFIA

BELLEW, H. W. (1885). *The history of cholera in India from 1862-1881*. Londres: Trübner.

BOUMA, M.; DYE, C. (1997). «Cycles of malaria associated with El Niño in Venezuela». *JAMA*, 278, p. 1772-1774.

BOX, G. E. P.; JENKINS, G. M. (1970). *Time series analysis, forecasting and control*. Boca Raton, Fla.: Holden-Day.

CASH, B. A.; RODÓ, X.; KINTER III, J. L. (2008). «Links between tropical Pacific SST and the regional climate of Bangladesh: role of the eastern and central tropical Pacific». *J. Clim.* [En revisió].

CASDAGLI, M. (1992). «A dynamical systems approach to modeling input-output systems». A: CASDAGLI, M.; EUBANK, S. [ed.]. *Nonlinear modeling and forecasting*. Nova York: Addison-Wesley.

DIFFENBAUGH, N. S.; SNYDER, M. A.; SLOAN, L. C. (2004). *Could CO₂-induced land-cover feedbacks alter near-shore upwelling regimes?* *PNAS*, 101 (1), p. 27-32.

ELLNER, S. P.; BAILEY, B. A.; BOBASHEV, G. V.; GALLANT, A. R.; GRENFELL, B. T.; NYCHKA, D. W. (1998). «Noise and nonlinearity in measles epidemics: combining mechanistic and statistical approaches to population modeling». *Am. Nat.*, 151 (5), p. 425-440.

EPICA COMMUNITY MEMBERS (2004). «Eight glacial cycles from an Antarctic ice core». *Nature*, 429, p. 623-628.

FINKENSTADT, B.; KEELING, M.; GRENFELL, B. T. (1998). «Pat-

- terns of density dependence in measles dynamics». *Proc. Roy. Soc. Lond.*, B265, p. 753-762.
- LORENZ, E. N. (1963). «Deterministic nonperiodic flow». *J. Atmos. Sci.*, 20, p. 130-141.
- MANN, M.; BRADLEY, R. S.; HUGHES, M. K. (1998). «Global-scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries». *Nature*, 392, p. 779-787.
- MOBERG, A.; SÓNECHKLN, D. M.; HOLMGREN, K.; DATSENKO, N.; KARLEN, W. (2005). «Highly variable Northern Hemisphere temperatures reconstructed from low- and high-resolution proxy data». *Nature*, 433, p. 613-617.
- PASCUAL, M.; RODÓ, X.; ELLNER, S.; COLWELL, R.; BOUMA, M. (2000). «Cholera dynamics and El Niño-Southern Oscillation». *Science*, 289, p. 1766-1769.
- RODÓ, X. (2001). «Reversal of three global atmospheric fields linking changes in SST anomalies in the Pacific, Atlantic and Indian oceans at tropical latitudes and midlatitudes». *Clim. Dyn.*, 18, p. 203-217.
- RODÓ, X.; RODRÍGUEZ-ARIAS, M. A. (2004). «Detecting transitory processes in the climate system with the Scale-Dependent Correlation (SDC) analysis: An application to remote El Niño forcing». *Climate Dynamics*, 27, p. 441-458.
- RODÓ, X.; PASCUAL, M.; FUCHS, G.; FARUQUE, A. S. G. (2002). «ENSO and cholera: A nonstationarity link related to climate change?» *PNAS*, 99 (20), p. 12901- 12906.
- RUELLE, D.; TAKENS, F. (1971). «On the nature of turbulence». *Commun. Math. Phys.*, 20, p. 167-192. [Correcció, *Commun. Math. Phys.*, 23 (1971), p. 343-344]
- RUSSELL, A. J. H. (1925-1926). «The epidemiology of cholera (I, II and III)». *The Indian Journal of Medical Research*, XIII, p. 427-439 i 637-691.
- (1926-1927). «The epidemiology of cholera (I, II and III)». *The Indian Journal of Medical Research*, XIV, p. 1-26.

- SHEARS (1994). «Cholera». *Annals of Tropical Medicine and Parasitology*, 88 (2), p. 109-122.
- STOCKER, T. F. (2003). «Changes in the global carbon cycle and ocean circulation on the millennial time scale». A: RODÓ, X.; COMIN, F. A. [ed.]. *Global climate: current research and uncertainties in the climate system*. Berlín: Springer-Verlag, p. 129-148.
- TAKENS, F. (1981). «Detecting strange attractors in turbulence». A: RAND, D.; YOUNG, L. S. [ed.]. *Dynamical systems and turbulence*. Vol. 898: *Lecture notes in mathematics*. Nova York: Springer-Verlag, p. 366-381.
- WHO (2004). *Using climate to predict infectious disease outbreaks: A review*. Ginebra. 55 p.