

# La cerca i la recerca de la complexitat a Catalunya: complexitat.CAT

Álvaro Corral<sup>1,2</sup>, Albert Díaz-Guilera<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Centre de Recerca Matemàtica, Edifici C, Campus Bellaterra

<sup>2</sup> Departament de Matemàtiques, Facultat de Ciències, Universitat Autònoma de Barcelona

<sup>3</sup> Departament de Física Fonamental, Facultat de Física, Universitat de Barcelona

## RESUM

*Intentem, primer, donar una idea de què són els sistemes complexos, i repassem l'activitat de recerca duta en aquest àmbit a Catalunya. També comentem la creació de la xarxa complexitat.CAT i els seus objectius, així com els indicadors de producció científica de la comunitat local.*

Doi: <http://dx.doi.org/10.2436/20.2001.01.7>

## 1 Introducció: els sistemes complexos

Durant els darrers cent anys, la física ha procedit a expandir les seves fronteres cap al més petit (l'àtom, el nucli, els quarks) i cap al més gran (les galàxies, l'expansió de l'univers...) [1]. Podem trobar, però, una altra frontera molt més a prop nostre: la frontera dels sistemes complexos. I que són els sistemes complexos? Si fossin fàcils de definir voldria dir que no són complexos; de tota manera, com a d'altres coses a la vida, podem reconèixer un sistema complex quan el veiem: un fluid turbulent, el clima, l'economia, la política, la cèl·lula, el cervell, els ecosistemes, les ciutats, Internet... Pràcticament tots els problemes que afronta la humanitat al segle XXI venen de la nostra incapacitat de comprendre els sistemes complexos [2].

Mirant el llistat anterior ens podem adonar que algunes característiques comunes dels sistemes complexos són:

- Primer, que estan compostats de moltíssimes parts o unitats (al contrari que els sistemes més paradigmàtics de la física con l'àtom d'hidrogen o el sistema solar).
- Segon, que el comportament del sistema no ve caracteritzat pel comportament de les seves parts, sinó que hi ha un comportament global emergent, o, com va dir Aristòtil, el tot és més que la suma de les parts (al contrari del que passa a un gas ideal o a un material paramagnètic). Això vol dir que el procediment reduccionista habitual en física de descompondre el tot en les seves parts i investigar aquestes parts per separat, simplement no funciona amb els sistemes complexos.
- Tercer, que són sistemes normalment allunyats de l'equilibri, en el cas que tingui algun sentit definir un estat d'equilibri (encara que també hi ha investigadors que sostenen que poden haver sistemes en equilibri genuïnament complexos...).

Haureu notat que als nostres exemples hem barrejat sistemes que pertanyen a disciplines diverses: la física, les ciències socials, la biologia... Llavors, per què la ciència dels sistemes complexos hauria de ser una part de la física? Encara no sabem prou d'aquests sistemes com per a poder respondre aquesta pregunta [3,4], el que sí sabem és que el cas ben entès més proper a un sistema complex s'obté en aplicar la maquinària de la física estadística d'equilibri a les transicions de fase. Si "capturem" un gas presumptament ideal i el comprimint una quantitat justa, ajustant també amb molta cura la temperatura, podem posar-ho al seu punt crític, on no és possible distingir l'estat gasós de l'estat líquid, i on el material podem dir que presenta la màxima complexitat, en el sentit que emergeixen estructures a "totes" les escales espacials i temporals (per a incrementar la confusió, els matemàtics dirien que la màxima complexitat correspon al gas ideal, però en realitat ells parlen d'aleatorietat). La física estadística d'equilibri és una rara joia dintre de la ciència dels sistemes complexos, i no existeix una teoria equivalent de no-equilibri ni tan sols pels fenòmens purament físics. Malgrat això, els físics estadístics han gosat de fer servir eines i conceptes de la física de no-equilibri per a intentar estripar tota mena de fenòmens més enllà de la física. En aquest número monogràfic es presenten alguns exemples selectes.

Apart de l'interès de cada sistema particular, la qüestió clau és: "com pot ser que l'univers va començar amb uns pocs tipus de partícules elementals i va arribar a la vida, la història, l'economia, i la literatura?" "Per què el Big Bang no va formar un gas simple de partícules o va condensar en un gran pedrot?" En definitiva, per què a totes les escales apareix complexitat [5]? Deixant de banda els enfocaments típics de cada disciplina més o menys estreta, la ciència dels sistemes complexos aporta, per un costat, anàlisi massiu i sistemàtic de "big data" (el que, curiosament, s'havia menyspreat en algunes disciplines

acadèmiques) i per un altre, models matemàtics idealitzats (com per exemple, el model d'Ising), que malgrat la seva simplificació extrema han de ser simulats per ordinador, degut precisament a l'emergència de noves propietats a través de les interaccions entre els seus múltiples components. A més, tota mena d'eines matemàtiques són benvingudes per a aportar llum als sistemes complexos: teoria dels sistemes dinàmics, processos estocàstics, teoria de la informació, teoria de jocs, topologia de xarxes, mètodes numèrics, estadística i anàlisi de dades, intel·ligència artificial [6]...

Malgrat el nostre biaix físico-centric, és inevitable reconèixer que les primeres idees sobre sistemes complexos a Catalunya van aparèixer al camp de la biologia, gràcies a l'agudesa del gran ecòleg Ramon Margalef. La seva empenta va influir alguns físics, entre ells l'inquiet Jorge Wagensberg [7]. Però no va ser fins a principis dels anys 90 que es va iniciar el boom de la física dels sistemes complexos a Catalunya, mitjançant uns pocs investigadors joves, que, de manera independent i un xic solitària, van decidir cabussar-se en aquest món. Aquesta llavor inicial ha fet emergir, avui dia, una fauna complexa de grups de recerca escampada per tot el sistema universitari català que es barallen amb els problemes (científics, volem dir) més heterodoxes, en un gran esforç interdisciplinari. Però deixeu-nos ser per una vegada reduccionistes i anar, com faria Jack l'Esbudellador, separant per parts la recerca en complexitat a Catalunya. Amb casi total seguretat, els camps més conreats són el de les xarxes complexes i el dels sistemes biològics, però els tentacles d'aquesta comunitat arriben fins a l'anomenada econofísica, la lingüística (lingüística quantitativa però), la geociència no-lineal, i tornen finalment cap a la pròpia física.

## 2 Xarxes complexes

L'espurna que va portar a l'esclat d'investigació en xarxes complexes va ser l'article de Watts i Strogatz sobre xarxes *small world* publicat a *Nature* al juny del 1998 [8]. La casualitat va fer que fos a l'endemà de la publicació que Strogatz havia de venir a Catalunya per a participar al XV Congrés de Sitges de Mecànica Estadística, on va presentar els seus flamants resultats. Aquestes idees van tenir molt bona acollida a la comunitat local, que encara que aleshores era petita ja tenia una sòlida experiència en altres àrees de la complexitat (com ara els sistemes biològics o la criticitat auto-organitzada). Com va passar a nivell internacional, una bona part d'investigadors en sistemes complexos es van sumar al repte iniciat per Watts i Strogatz de desvetllar la complexitat de les xarxes i la seva ubiqüitat.

Des de llavors, l'estudi de les xarxes complexes ha esdevingut un camp de frenètica activitat a Catalunya. Només dels grups liderats per físics, destaquem els de la UB i

UPC, a Barcelona, i els de la URV, a Tarragona. Els grups del Departament de Física Fonamental de la UB [9] i els d'Enginyeria Informàtica i Matemàtiques [10] i d'Enginyeria Química [11] de la URV presenten una xarxa d'interaccions entre ells molt densa, amb molts d'interessos comuns (i d'altres no comuns). Podem mencionar entre aquests l'estudi de les xarxes socials, les xarxes de comunicacions, les xarxes biològiques, els fenòmens de sincronització en xarxes, la teoria per esbrinar l'estructura mesoscòpica de les xarxes, i les xarxes incrustades a espais mètrics. El grup del Departament de Física i Enginyeria Nuclear de la UPC [12] és proper també a aquestes investigacions, destacant principalment en l'anàlisi de processos epidèmics en xarxes, l'estructura d'Internet i les xarxes temporals. Encara n'hi ha d'altres investigadors que tracten amb xarxes complexes, però referides a sistemes més concrets i els mencionem en els apartats corresponents.

## 3 Sistemes biològics

Quin és el sistema més complex que existeix? Sense una definició clara de complexitat no podem donar una resposta quantitativa, però quin dubte cap que els sistemes biològics estan entre els candidats més clars. Un dels camps científics on Catalunya despunta és el de la biologia, amb institucions punteres com per exemple les del Parc de Recerca Biomèdica de Barcelona (PRBB). En aquest apartat parlarem però de la investigació biològica guiada per la filosofia de la ciència dels sistemes complexos. Deixant de banda la investigació ja mencionada en xarxes biològiques, hi ha grups molt actius a la UPF, a la UPC, a la UB i a la UAB.

Començant per la UPF, destaquem els dos grups del Departament de Ciències Experimentals i de la Salut (també al PRBB). Al primer (en ordre arbitrari) la investigació es centra en entendre el patrons d'organització biològics, incloent replicadors prebiòtics, virus, multi-cel·lularitat, o càncer [13]. Qüestions claus són com es desenvolupen estructures robustes, com s'incorpora la informació a aquestes estructures i com emergeix la computació. El segon grup de la UPF estudia fenòmens induïts per soroll, la sincronització, la formació de patrons, la excitabilitat o comportaments tipus cicle límit, en fenòmens com la regulació genòmica i el processament d'informació [14]. Els sistemes vius contemplats inclouen les bacteries, les cèl·lules mare, el sistema immunitari i el cervell.

Al grup de la UPC del campus de Terrassa [15] els objectius estan molt relacionats amb aquests temes, destacant en l'aplicació dels processos estocàstics a les tasques de processament d'informació cel·lular i a la dinàmica de poblacions, així com en xarxes neuronals i dinàmica del cervell. En particular podem ressaltar l'ús de làsers com models dels senyals neuronals. Notem que dintre dels sis-

temes biològics complexos, el cervell ostenta una posició molt prominent, degut a la seva capacitat de desenvolupar ell mateix models d'altres sistemes complexos (en el cas al menys del cervell humà) i de contenir dintre del seu funcionament la solució a l'enigmàtic problema de la consciència [16]. Ja als anys 80 els físics van començar a estudiar models plausibles però molt simplificats de xarxes neuronals, fent servir analogies amb la física dels materials magnètics i dels materials desordenats i les matemàtiques de la teoria dels sistemes dinàmics [17], encara que l'evolució dels models i de les dades experimentals des de llavors ha estat espectacular. També a la UPC, però de Barcelona, al Departament de Física Aplicada estan interessats en la dinàmica d'un sistema més o menys tan important com el cervell i que té algunes característiques comunes amb aquest: el cor; en concret en la propagació dels potencials d'acció cardíacs i les seves inestabilitats, fent servir tècniques de sistemes dinàmics i de formació de patrons de no-equilibri [18].

És molt remarcable que al Departament d'Estructura i Constituents de la Matèria de la UB no només fan modelització de processos neuronals sinó també experiments amb neurones reals (vives!), una cosa fins fa poc temps tancada només als departaments de biologia [19]. Òbviament, en aquest camp (al contrari del que passa, diguem-ne, a la teoria de cordes), l'avenç ha d'anar molt lligat al coneixement empíric, i desenvolupar els experiments dins el propi grup no només facilita la gènesi de models teòrics i esperona futurs estudis, sinó que permet dissenyar els experiments pensant en la seva modelització física com a sistema complex, és a dir, donant més importància a les propietats col·lectives del sistema que als seus detalls microscòpics. El mateix grup de la UB està també especialitzat en altres temes de biofísica, com l'estudi de la mecànica i la diferenciació de les cèl·lules, el tràfic intracel·lular, la morfogènesi, la formació de patrons espai-temporals en teixits, la física estadística de canals iònics, i la angiogènesi.

Sense moure'ns de la UB, al Departament de Química Física també s'investiga sobre la complexitat dels sistemes vius; entre d'altres, l'organització de biomembranes en equilibri i no-equilibri, les interaccions moleculars dintre de la cèl·lula, el processos de senyalització que lliguen els estímuls externs amb les accions cel·lulars i en general tota mena de problemes que involucren el comportament col·lectiu de cèl·lules, gens, organismes, etc. [20]. Per una altra banda, a la línia de matèria tova activa s'aplica la mateixa filosofia, estudiant preparats proteínics de tubulines i kinesines que donen lloc a gels actius organitzats mitjançant el consum d'ATP.

I encara dintre de la UB, al Departament de Física Fonamental hi ha interessos similars, com les xarxes metabòliques [9], o de més diferents, com les propietats mecàniques i l'auto-muntatge de les arquitectures dels virus, els

sistemes actius (partícules auto-propulsades i models de bacteris), o la interacció de nanopartícules amb sistemes biològics, amb clares aplicacions a la toxicologia [21,22]. Una altra línia, al mateix departament, tracta la biofísica a nivell molecular, destacant, a més de l'enfocament teòric, la realització d'experiments amb molècules individuals, mitjançant pinces òptiques [23]. L'objectiu general és investigar la rellevància de les fluctuacions fora d'equilibri en aquests sistemes, no només sota la filosofia de que la física pot ajudar a entendre els sistemes biològics, sinó també a l'inrevés.

Travessant tota la Serra de Collserola, al Departament de Física de la UAB s'investiguen l'estructura i principis d'organització a les xarxes tròfiques dels ecosistemes (les relacions de qui menja a qui), la teoria de jocs evolutiva (la cooperació o no entre organismes, i l'efecte de l'existència de tramposos), o els models mesoscòpics de transport a nivell cel·lular i d'ecosistemes [24]. Al mateix campus, al Centre de Recerca Matemàtica, es treballa sobre la modelització del creixement tumoral a la multiescala, els principis de regulació i adaptació del sistema vascular (en particular la microcirculació) o la influència de la hipòxia al cicle cel·lular [25]. En el súmmum del trencament de barreres entre disciplines, aquest centre de matemàtiques disposa d'un laboratori per a mesurar les propietats físiques dels fluids biològics a la nano-escala, com per exemple la sang.

## 4. Miscel·lània

L'aplicació de les eines de la física estadística i de la ciència dels sistemes complexos a l'economia i les finances ha rebut en els darrers anys el curiós nom d'*econofísica*. El seu origen és, però, més antic, i ens podríem remuntar als anys seixanta (del segle xx), amb els treballs a contracorrent de l'atípic matemàtic Benoît Mandelbrot [26,27]. És molt destacable la vessant empírica d'aquests treballs, amb l'estudi estadístic dels preus de diverses mercaderies, però el que és més remarcable és que hagi de ser destacable que algú fes un model a l'economia amb una base empírica.

A la UB, al Departament de Física Fonamental, hi ha un grup molt actiu que segueix aquesta línia, dedicat als mercats financers. Sobretot estudien la dinàmica dels preus proposant models matemàtics amb idèntiques propietats a les observades en el mercat i vàlids per quantificar estadístics relatius per exemple a la mesura del risc com ara el temps de primera passada o ja més recentment l'economia del canvi climàtic entre molts altres temes [28]. Al mateix departament, un altre tòpic que s'ha estudiat és l'evolució de la xarxa del comerç bilateral entre països [9].

Un altre tema clàssic dintre dels sistemes complexos és la lingüística quantitativa, que comprèn l'estadística de textos i l'evolució (quantitativa) del llenguatge, encara que no

podem atribuir als físics el mèrit d'iniciar aquesta disciplina. El pare de l'estudi de les propietats estadístiques dels textos va ser el lingüista heterodox George K. Zipf, a la primera meitat del segle xx. Zipf va cridar l'atenció sobre algunes regularitats sorprenents que apareixen quan es compten les repeticions de les paraules als textos (sense fer servir ordinadors llavors, però sí prou estudiants), en particular, l'ara anomenada *lleï de Zipf*. Cent anys després de la primera observació d'aquesta lleï, tant els lingüistes quantitativs com els físics de la complexitat encara es barallen per entendre aquests patrons, que a més es donen també en comptar la població de les ciutats o la grandària de les empreses.

Catalunya té investigadors molt productius en aquest terreny, tant a la UPF [13] com a la UPC [29]. Entre molts treballs, podem assenyalar l'estudi de l'equilibri entre l'esforç de l'emissor i el del receptor per explicar la lleï de Zipf, l'estructura de xarxa que forma la successió de les paraules als textos, el desenvolupament del llenguatge en nens [13,29], les restriccions de l'ordre sintàctic, els trets universals del llenguatge en altres espècies animals, o l'evolució del llenguatge [29]. Altres grups han estudiat també les xarxes semàntiques, a la URV [10], l'evolució del llenguatge, a la UPC [12], o d'altres propietats invariants d'escala tant als textos com a la música, al Centre de Recerca Matemàtica [30].

Canviant d'escala, la geosfera, que comprèn la litosfera, la hidrosfera, la criosfera i l'atmosfera, és òbviament un sistema complex, encara que no s'ha tractat com a tal fins recentment, en una superdisciplina que s'anomena a si mateixa, de vegades, *geociència no lineal*. El seu punt de partida el podem situar una altra vegada en els treballs de Mandelbrot [26], amb el desenvolupament i l'aplicació de la geometria fractal, i d'altres mètodes no lineals a hidrologia. No podem dir que el nombre de grups en aquesta òrbita a Catalunya sigui gran (malgrat la riquesa «geonatural» del territori!), però sí que els seus investigadors intenten abastar el millor que poden terra, mar i aire.

Assenyallem, per començar, que a l'Institut de Ciències del Mar, del CSIC, s'ha aplicat intensivament l'anàlisi multifractal als fluxos turbulents, i en particular a l'oceanografia per satèl·lit, per extreure informació molt valuosa de la dinàmica i els processos que tenen lloc a la superfície del mar [31]. A més, el grup és cada cop més actiu en l'anàlisi del problema, a nivell físic i social, de l'arribada a l'històric moment del zenit productiu de les primeres matèries no renovables [32]. Destaquem també la investigació duta a terme al campus de Terrassa de la UPC [15], on, a partir de sèries temporals de dades climatològiques, s'estudien les anomenades *teleconnexions* (com ara la influència del fenomen d'El Niño a la resta del planeta), mitjançant la construcció de les xarxes climàtiques associades; una altra línia relacionada és la de les onades extremes, que no s'estudien al mar, per la dificultat intrínseca, sinó a anàlegs òptics. Finalment, al Centre de Recerca Matemàtica, s'han estudiat

els patrons estadístics de diverses catàstrofes naturals, com per exemple terratrèmols, huracans, pluges, o incendis forestals, des del punt de vista dels fenòmens crítics de les transicions de fase i la teoria de valors extrems [30].

## 5. Física dels sistemes complexos

Després d'aquest llarg periple per diversos camps científics, podem tornar a la física més pròpiament dita per mostrar que la ciència dels sistemes complexos també hi té coses a dir. Per exemple, al grup ja mencionat del Departament d'Estructura i Constituents de la Matèria de la UB [19] es dediquen també a la dinàmica dels fluids. Estudien inestabilitats en fluids complexos, suspensions de bombolles en microgravetat, dinàmica de fronts, microfluídica, i transport i difusió en medis desordenats. Un altre grup del mateix departament estudia, mitjançant experiments, simulació per ordinador i teoria, processos físics en materials molt diversos, com ara les transformacions martensítiques, l'anomenat *soroll Barkhausen* en materials magnètics, o les fractures. D'especial interès és quan la dinàmica dels materials no és contínua sinó que té lloc en termes d'allaus [33]. En relació amb les fractures, també és molt remarcable el treball del grup de la UPC de Terrassa [15], on consideren models teòrics de la dinàmica dels cracks en tres dimensions per descriure l'evolució no lineal dels fronts de fractura.

També a la UB, però al Departament de Física Fonamental, un altre grup mencionat a l'àmbit de la complexitat biològica [21,22] es dedica a més a fenòmens complexos en física estadística com ara la deformació irreversible en sòlids, la dinàmica de dislocacions, la nucleació, el sobrefredament en líquids anòmals, transicions de fase líquid-líquid, col·loides actius i fenòmens col·lectius emergents en matèria tova en general. Un altre fenomen que s'investiga al mateix departament és l'estat vitri, que és un comportament de no-equilibri però molt lent, i on es viola el teorema de fluctuació-dissipació [23]. Nanopartícules, membranes, col·loides i automuntatge també són objecte de recerca a l'Institut de Ciències de Materials de Barcelona (del CSIC), mitjançant simulacions de dinàmica molecular i teoria [34].

## 6. complexitat.CAT

Per aprofitar tot el potencial científic de Catalunya a l'àrea dels sistemes complexos, fa uns anys (el 2010) es va crear, espontàniament (com no podia ser d'una altra manera), la xarxa complexitat.CAT, que intenta aglutinar els investigadors locals interessats en aquests temes [35]. Actualment, complexitat.CAT integra un bon grapat de físics però també biòlegs, informàtics, matemàtics, químics, etc. El primer





Figura 1: Mostra dels participants a la IV Jornada complexitat.CAT, que va tenir lloc el maig de 2015 a Tarragona, al campus de la URV. (Foto de Cristina Masoller.)

objectiu va ser tenir una web on es recol·lectessin tots els esdeveniments relacionats amb els sistemes complexos a Catalunya (seminaris, tesis doctorals, congressos, beques), i el següent va ser incentivar i organitzar activitats pròpies.

Així, una d'aquestes és el cicle de seminaris «Més enllà de la física: reptes multidisciplinaris» que pretenen donar una visió molt àmplia amb la participació d'un expert reconegut mundialment en el camp dels sistemes complexos. També resulten molt interessants les Jornades complexitat.CAT, que fan possible que almenys un cop a l'any es pugui trobar tota la comunitat (vegeu la figura 1). I és destacable que el setembre de 2013 es va organitzar a Barcelona l'European Conference on Complex Systems [36], que és el congrés més important del món en l'àmbit de la complexitat. L'edició de Barcelona va batre el rècord d'assistència amb prop de 800 participants. Finalment, el 2015, i vinculat a complexitat.CAT, es va constituir legalment l'Associació Catalana per a l'Estudi dels Sistemes Complexos, on tots els investigadors interessats i simpatitzants varis poden demanar de ser-ne membres.

## 7. Producció científica

Per acabar amb aquesta introducció, deixeu-nos simplement comentar-vos què en traiem d'una capbussada en la *Web of Science* (WoS). Posant com a única condició de cerca els noms dels físics que formen part de complexitat.CAT (els que apareixen en la web) trobem uns 1500 articles publicats entre el 2000 i el 2015. Tots sabem que cal anar amb molta cura amb aquestes cerques i les ambigüitats dels noms. Hem fet el possible per fer-ne una cerca neta

especificant al mateix temps alguns detalls de les adreces. Un dels primers fets que sobten és que si ens restringim a l'àrea que la WoS especifica com a «Physics», de tal manera que tenim més control sobre els autors, deixem fora al voltant del 30 % de les publicacions. Però justament aquí és on rau part de la recerca de la física dels sistemes complexos, en la seva inherent inter- o multidisciplinarietat.

D'aquesta primera cerca general trobem el 17 % de les publicacions a *Physical Review E* i el 8 % a *Physical Review Letters*. Certament, la primera de les xifres no ens ha de sorprendre perquè PRE és la revista de referència de l'*American Physical Society* en les temàtiques de recerca de la comunitat. En canvi, l'impacte a *Physical Review Letters* (tradicionalment la revista de més prestigi en el món de la física) confirma la qualitat de la recerca en complexitat a casa nostra dins del camp genèric de la física. La figura 2 mostra el pes de les diferents revistes quant a nombre

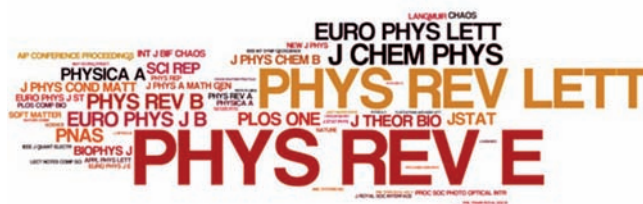


Figura 2: Importància de cada revista científica segons el nombre d'articles publicats pels físics complexòlegs catalans entre els anys 2000 i 2015. Aquesta figura i les posteriors s'han elaborat emprant l'eina wordle (<http://www.wordle.com>), on la mida relativa de cada concepte és proporcional a la seva freqüència.



valorem el finançament a través dels projectes FIS2012-31324 i FIS2012-38266 (MINECO), i 2014SGR1307 i 2014SGR608 (AGAUR).

## Bibliografia

- [1] National Research Council. Physics in a New Era: an Overview. National Academy Press, Washington D.C., 2001.
- [2] D. J. WATTS. A twenty-first century science. *Nature*, **445**, 489-489 (2007).
- [3] P. W. ANDERSON. More is different. *Science*, **177**, 393-396 (1972).
- [4] R. B. LAUGHLIN. Un universo diferente. Katz Editores, Buenos Aires (2007).
- [5] P. BAK. How Nature Works: The Science of Self-Organized Criticality. Copernicus, Nova York (1996).
- [6] M. E. J. NEWMAN. Resource letter CS-1: Complex systems. *Am. J. Phys.*, **79**, 800-810 (2011).
- [7] J. FLOS. Ecología, entre la magia y el tópico. *Omega* (1984).
- [8] D. J. WATTS i S. H. STROGATZ. Collective dynamics of small-world networks. *Nature*, **393**, 440-442 (1998).
- [9] PHYSICS AND COMPUTATION OF COMPLEX SYSTEMS. <http://complex.ffn.ub.es/physcomp>
- [10] ALEPHSYS LAB. [deim.urv.cat/~alephys](http://deim.urv.cat/~alephys)
- [11] SCIENCE AND ENGINEERING OF EMERGING SYSTEMS. <http://seeslab.info>
- [12] <http://www.fen.upc.es/~romu>
- [13] COMPLEX SYSTEMS LAB. <http://complex.upf.es/~ricard>
- [14] DYNAMICAL SYSTEMS BIOLOGY LAB. <http://dsb.upf.edu>
- [15] NONLINEAR DYNAMICS, NONLINEAR OPTICS AND LASERS. <http://donll.upc.edu>
- [16] F. CRICK. La busca científica del alma. Debate, Madrid (2003).
- [17] J. J. HOPFIELD. Brain, neural networks, and computation. *Rev. Mod. Phys.*, **71(2)**, S431-S437 (1999).
- [18] CARDIAC DYNAMICS LAB. <http://www-fa.upc.es/websfa/eupb/NOLIN/CARDIAC>
- [19] NONLINEAR PHYSICS GROUP. <http://www.ecm.ub.es/nonlinphys>
- [20] SELF ORGANIZED COMPLEXITY AND SELF ASSEMBLED MATERIALS. <http://www.ub.edu/socsam/cms>
- [21] STATISTICAL PHYSICS GROUP. <http://www.ffn.ub.edu/~statphysgroup>
- [22] <http://www.ignasipagonabarraga.eu>
- [23] SMALL BIOSYSTEMS LAB. <http://www.ffn.ub.es/ritort>
- [24] STATISTICAL PHYSICS GROUP. <http://grupsderecerca.uab.cat/festa>
- [25] COMPUTATIONAL AND MATHEMATICAL BIOLOGY GROUP. <http://sites.google.com/site/tomasalarc>
- [26] B. MANDELBROT. La geometría fractal de la naturaleza. Tusquets, Barcelona (1997).
- [27] Per a una perspectiva més àmplia, vegeu l'article de J. DUCH et al. en aquest mateix número monogràfic.
- [28] PHYSICS AND FINANCE GROUP. <http://finance.ffn.ub.es/node>
- [29] COMPLEXITY AND QUANTITATIVE LINGUISTICS LAB. <http://www.cs.upc.edu/~rferrericancho>
- [30] COMPLEX SYSTEMS GROUP. <http://www.crm.cat/en/About/People/Researchers/acorral>
- [31] PHYSICAL OCEANOGRAPHY. <http://ww2.icm.csic.es/oce/es/content/turiel>
- [32] The Oil Crash. <http://crashoil.blogspot.com.es>
- [33] TRANSICIONS DE FASE I SISTEMES MULTIESCALA. [http://www.ub.edu/dyn/cms/print/p.jsp?u=/continguts\\_en/recerca\\_innovacio/recerca\\_a\\_la\\_UB/grups/fitxa/M/MATEFASE/index.html](http://www.ub.edu/dyn/cms/print/p.jsp?u=/continguts_en/recerca_innovacio/recerca_a_la_UB/grups/fitxa/M/MATEFASE/index.html)
- [34] <http://icmab.es/staff/detail/593>
- [35] <http://www.complexitat.cat>
- [36] <http://www.eccs13.eu>