



EXPLICANT LA COMPLEXITAT

#ExplicantComplexitat
#ComplexityExplained

TAULA DE CONTINGUTS

1	Interaccions	4
2	Emergència	6
3	Dinàmica	8
4	Autoorganització	10
5	Adaptació	12
6	Interdisciplinarietat	14
7	Mètodes	16



EXPLICANT LA COMPLEXITAT

"No hi ha amor en un àtom de carboni, ni huracà en una mol·lècula d'aigua, ni col·lapse financer en un bitllet de dòlar."

– Peter Dodds

La ciència de la complexitat, també anomenada ciència dels sistemes complexos, estudia com un gran nombre de components – que a petita escala interactuen entre ells localment – poden autoorganitzar-se espontàniament i mostrar comportaments i estructures globals no trivials a escales més grans, sovint sense intervenció externa, autoritats centrals ni líders. Les propietats del conjunt no poden entendre's o predir-se a partir del complet coneixement dels seus constituents aïllats. D'un conjunt com aquest se'n diu sistema complex i requereix de nous marcs matemàtics i de noves metodologies científiques per ser investigat.

Aquí et mostrem unes quantes coses que hauries de saber sobre els sistemes complexos.



INTERACCIONS

ELS SISTEMES COMPLEXOS ESTAN FORMATS PER UN GRAN NOMBRE DE COMPONENTS QUE INTERACTUEN ENTRE ELLS I AMB EL SEU ENTORN DE MOLTES MANERES DIFERENTS.



"Cada objecte d'estudi de la biologia és un sistema de sistemes."

- Francois Jacob

Els sistemes complexos sovint es caracteritzen per diversos components que interactuen de moltes maneres entre si i potencialment també amb el seu entorn. Aquests components formen xarxes d'interaccions, de vegades només amb un pocs components involucrats en moltes interaccions. Les interaccions poden generar nova informació que fa difícil estudiar els components de forma aïllada o predir el seu futur completament. A més a més, els components d'un sistema poden esdevenir al mateix temps nous sistemes, és a dir, sistemes de sistemes, interdependents els uns dels altres. El principal repte de la ciència de la complexitat no és només veure les parts i les seves connexions sinó entendre com aquestes connexions donen lloc al tot.

EXEMPLES:

- Milers de milions de neurones interactuant al cervell humà
- Ordinadors comunicant-se a internet
- Humans en relacions polifacètiques

CONCEPTES RELLEVANTS:

Sistema, component, interaccions, xarxa, estructura, heterogeneïtat, interrelació, interconnectivitat, interdependència, subsistemes, límits, entorn, sistemes oberts/tancats, sistemes de sistemes.

REFERÈNCIES:

Mitchell, Melanie.

Complexity: A Guided Tour

[Complexitat: un recorregut guiat].

Oxford University Press, 2009.

Capra, Fritjof and Luisi, Pier Luigi.

The Systems View of Life: A Unifying Vision

[L'enfocament sistèmic de la vida: una perspectiva unificadora].

Cambridge University Press, 2016.





EMERGÈNCIA

LES PROPIETATS D'UN SISTEMA COMPLEX EN EL SEU CONJUNT SÓN MOLT DIFERENTS, I SOVINT INESPERADES, DE LES PROPIETATS DELS SEUS COMPONENTS INDIVIDUALS.

*"No necessites més per aconseguir més.
Això és el que significa emergència."
- Murray Gell-Mann*

En sistemes simples, les propietats del tot poden entendre's o predir-se a partir de la suma o agregació dels seus components. En altres paraules, les propietats macroscòpiques d'un sistema simple poden deduir-se de les propietats microscòpiques de les seves parts. En sistemes complexos, en canvi, les propietats del tot sovint no poden entendre's o predir-se partir del coneixement dels seus components, a causa d'un fenomen conegut com "emergència". Aquest fenomen involucra diversos mecanismes que provoquen que la interacció entres els components d'un sistema generi nova informació i que es presentin estructures i comportaments no trivials a escales més grans. Aquest fet es resumeix sovint amb la dita popular "el tot és més que la suma de les parts".

EXEMPLES:

- Una quantitat massiva d'aire i mol·lècules d'aigua formant un tornado
- Múltiples cèl·lules formant un organisme viu
- Milers de milions de neurones en un cervell produint consciència i intel·ligència

CONCEPTES RELLEVANTS:

Emergència, escales, no-linealitat, de baix a dalt, descripció, sorpresa, efectes indirectes, no intuïtiu, transició de fase, no reductibilitat, trencament del pensament tradicional lineal/estadístic, "el tot és més que la suma de les parts".

REFERÈNCIES:

Bar-Yam, Yaner.
Dynamics of Complex Systems
[Dinàmica dels sistemes complexos].
Addison-Wesley, 1997.

Ball, Philip.
Critical Mass: How One Thing Leads to Another
[Massa Crítica: cómo una cosa porta a una altra].
Macmillan, 2004.

EMERGÈNCIA 2

DINÀMICA

ELS SISTEMES COMPLEXOS TENDEIXEN A CANVIAR ELS SEUS ESTATS DE MANERA DINÀMICA, SOVINT MOSTRANT COMPORTAMENTS IMPREDICTIBLES A LLARG TERMINI.

"Caos: Quan el present determina el futur, però el present aproximat no determina aproximadament el futur."
- Edward Lorenz

Els sistemes poden analitzar-se en termes de com canvien els seus estats al llarg del temps. Un estat queda descrit pels conjunts de variables que millor caracteritzen el sistema. Mentre el sistema canvia d'un estat a un altre, les seves variables també canvien, sovint responent al seu entorn. D'aquest canvi se'n diu lineal si és directament proporcional al temps, a l'estat actual del sistema o a canvis en l'entorn, o no lineal si no és proporcional a ells. Els sistemes complexos són típicament no lineals, canvien a diferents ritmes segons els seus estats o l'entorn. Poden tenir també estats estables en els quals poden romandre fins i tot essent pertorbats, o inestables en els quals una petita pertorbació pot alterar el sistema. En alguns casos, petits canvis en l'entorn poden canviar completament el comportament del sistema, són el que es coneix com a bifurcacions, transicions de fase o punts crítics.

Alguns sistemes son caòtics, extremadament sensibles a petites pertorbacions i impredecibles a llarg termini, exhibint el que es coneix com a efecte papallona. Un sistema complex pot dependre també de la seva trajectòria, és a dir, que el seu estat futur no sols depen de l'estat present, sinó també del seu historial previ.

EXEMPLES:

- El temps canviant constantment de manera imprevisible
- La volatilitat financera en el mercat bursàtil

CONCEPTES RELLEVANTS:

Dinàmica, comportament, no linealitat, caos, no equilibri, sensibilitat, efecte papallona, no predicibilitat, incertesa, dependència del camí/context, no ergodicitat.

REFERÈNCIES:

Strogatz, Steven H.
Nonlinear Dynamics and Chaos
[Dinàmica no lineal i caos].
CRC Press, 1994.

Gleick, James.
Chaos: Making a New Science
[Caos: fent una nova ciència].
Open Road Media, 2011.



AUTOORGANITZACIÓ

ELS SISTEMES COMPLEXOS PODEN AUTOORGANITZAR-SE I PRODUIR ESPONTÀNIAMENT PATRONS NO TRIVIALS SENSE UN DISSENY PREVI.

“Es suggereix que un sistema de substàncies químiques, anomenades morfogens, reaccionant conjuntament i difonent-se a través d'un teixit, és adequat per explicar els principals fenòmens de la morfogènesi.”
– Alan Turing

Les interaccions entre els components d'un sistema complex poden produir un patró o conducta global. Això sovint es qualifica com autoorganització, ja que no existeix cap control central o extern. En lloc d'això, el "control" d'un sistema autoorganitzat es distribueix entre els seus components i s'integra a través de les seves interaccions. L'autoorganització pot produir estructures físiques/funcionals com ara patrons cristal·lins en els materials i morfologies en els organismes vius, o comportaments dinàmics/informacionals com la formació de bancs de peixos i les polsacions elèctriques que es propaguen a través dels músculs dels animals. A mesura que el sistema esdevé més organitzat mitjançant aquest procés, nous patrons d'interacció poden sorgir amb el temps, que condueixen potencialment a la generació d'una major complexitat. En alguns casos, els sistemes complexos poden autoorganitzar-se en un estat "crític" que

només pot existir en un subtil equilibri entre al·leatorietat i regularitat. Els patrons que emergeixen de tals estats crítics autoorganitzats mostren normalment diverses peculiaritats, com ara autosemblança i propietats de patrons amb distribucions de probabilitat de cues llargues.

EXEMPLES:

- Un sol ovòcit dividint-se i eventualment autoorganitzant-se en la complexa forma d'un organisme
- Ciutats en creixement que atrauen més gent i diners
- Una gran població d'estornells formant bandades amb patrons complexos

CONCEPTES RELLEVANTS:

Autoorganització, comportament col·lectiu, patrons d'eixamenament, espai i temps, ordre a partir del desordre, criticalitat, autosemblança, abrupte, criticalitat autoorganitzada, lleis de potències, distribucions de cues llargues, morfogènesi, control descentralitzat/distribuït, autoorganització guiada.

REFERÈNCIES:

Ball, Philip. *The Self-Made Tapestry: Pattern Formation in Nature* [El tapís creat a si mateix: formació de patrons a la natura]. Oxford University Press, 1999.

Camazine, Scott, i altres. *Self-Organization in Biological Systems* [Autoorganització en sistemes biològics]. Princeton University Press, 2003.



AUTOORGANITZACIÓ 4



ADAPTACIÓ

ELS SISTEMES COMPLEXOS PODEN
ADAPTAR-SE I EVOLUCIONAR.

*“Res en biologia té sentit si no és a la llum
de l'evolució.”*

- Theodosius Dobzhansky

Més que simplement avançar cap a un estat estàtic, els sistemes complexos sovint són actius i responen al seu entorn-- la diferència entre una pilota que roda fins al final d'un turó i s'atura i un ocell que s'adapta als corrents de vent mentre vola. Aquesta adaptació pot succeir a múltiples escales: cognitiva, a través de l'aprenentatge i el desenvolupament psicològic; social, en compartir informació a través de vincles socials; o fins i tot evolutiva, a través de la variació genètica i la selecció natural. Quan els components d'un sistema es fan malbé o són eliminats, aquests sistemes sovint són capaços d'adaptar-se i recuperar la seva funcionalitat prèvia, i de vegades esdevenen fins i tot millors del que eren abans. Això pot aconseguir-se gràcies a la robustesa, la capacitat de resistir les pertorbacions; la resiliència, la capacitat de tornar a l'estat original després d'una llarga pertorbació; o adaptació, la capacitat del sistema de canviar-se a si mateix per mantenir-se funcional i sobreviure. Els sistemes complexos amb aquestes propietats s'anomenen sistemes complexos adaptatius.

EXEMPLES:

- Un sistema immunitari aprenent contínuament sobre patògens
- Una colònia de tèrmits que repara els danys causats al seu niu
- La vida terrestre que ha sobreviscut nombrosos esdeveniments catastròfics durant els seus milers de milions d'anys d'història

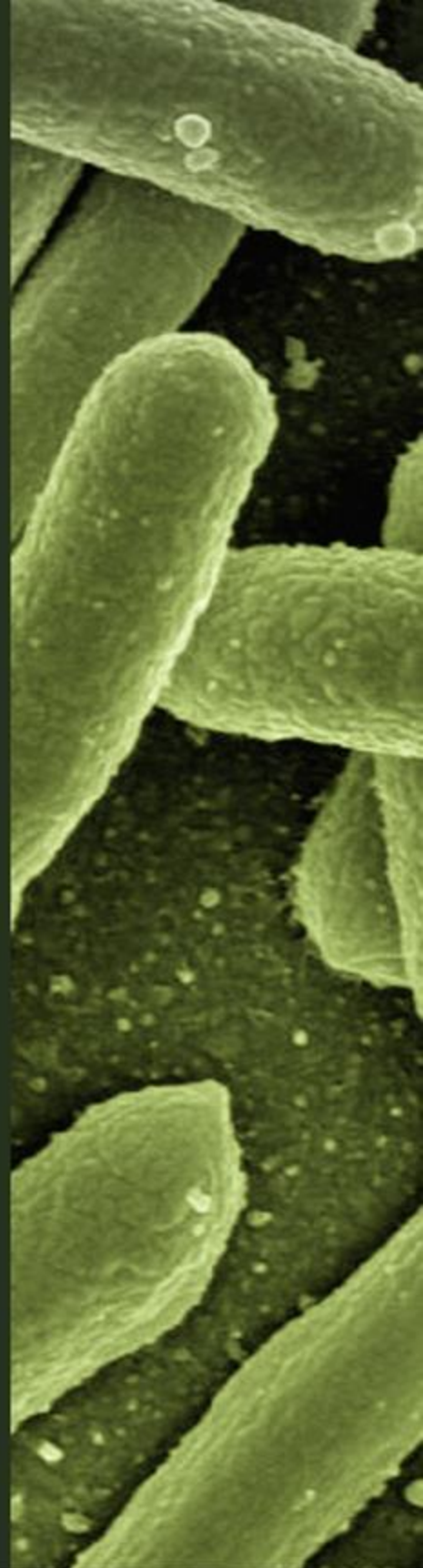
CONCEPTES RELLEVANTS:

Aprenentatge, adaptació, evolució, escenaris adaptatius, robustesa, resiliència, diversitat, sistemes complexos adaptatius, algorismes genètics, vida artificial, intel·ligència artificial, intel·ligència col·lectiva, creativitat, processos sense fi.

REFERÈNCIES:

Holland, John Henry. *Adaptation in Natural and Artificial Systems* [Adaptació en sistemes naturals i artificials]. MIT press, 1992.

Solé, Ricard i Elena, Santiago F. *Viruses as Complex Adaptive Systems* [Els virus com sistemes complexos adaptatius]. Princeton University Press, 2018.





INTERDISCIPLINARIETAT

LA CIÈNCIA DE LA COMPLEXITAT POT UTILITZAR-SE PER ENTENDRE I TRACTAR UNA ÀMPLIA VARIETAT DE SISTEMES EN MOLTS DOMINIS.

“Tanmateix pot ser que la recerca de propietats comuns entre diversos tipus de sistemes complexos no sigui totalment en va... Les idees de retroalimentació i informació proveeixen un marc de referència per considerar un bon rang de situacions.”
– Herbert Simon

Els sistemes complexos apareixen en tot tipus d'àmbits científics i professionals, incloent-hi la física, la biologia, l'ecologia, les ciències socials, les finances, els negocis, l'administració, la política, la psicologia, l'antropologia, la medicina, l'enginyeria, la tecnologia de la informació i més. Moltes de les últimes tecnologies, desde les xarxes socials i la tecnologia mòbil als vehicles autònoms i les cadenes de blocs (blockchain), produeixen sistemes complexos amb propietats emergents que són crucials per entendre i predir el benestar social. Un concepte clau de la ciència de la complexitat és la universalitat, la idea que molts sistemes en diferents àmbits presenten fenòmens amb característiques subjacents comunes que poden ésser descrites utilitzant els mateixos models científics. Aquests conceptes justifiquen un nou context matematico-computacional interdisciplinari.

La ciència de la complexitat proporciona un apropament integral, transdisciplinari i analític que complementa els enfocaments científics tradicionals, centrats en un tema específic de cada camp.

EXEMPLES:

- Propietats comunes de diversos sistemes de processament de la informació (sistemes nerviosos, Internet, infraestructures comunicatives)
- Patrons universals trobats en diversos processos de difusió (epidèmies, modes, incendis forestals)

CONCEPTES RELLEVANTS:

Universalitat, diverses aplicacions, multi/inter/trans-disciplinarietat, economia, sistemes socials, ecosistemes, sostenibilitat, solucions per a problemes del món real, sistemes culturals, rellevància per a les decisions de la vida diària.

REFERÈNCIES:

Turner, Stefan, Hanel, Rudolf i Klimek, Peter. *Introduction to the Theory of Complex Systems* [Introducció a la teoria dels sistemes complexos]. Oxford University Press, 2018.

Page, Scott E. *The Model Thinker* [El pensador de models]. Hachette UK, 2018.



MÈTODES

ELS MÈTODES MATEMÀTICS I COMPUTACIONALS SÓN EINES POTENTS PER ESTUDIAR ELS SISTEMES COMPLEXOS.



"Tots els models són erronis, però alguns són útils."
- George Box

Els sistemes complexos involucren moltes variables i configuracions que no poden ésser explorades simplement amb la intuïció o amb càlculs sobre el paper. En lloc d'això fan falta, gairebé sempre, la modelització computacional i matemàtica avançada, l'anàlisi i les simulacions per veure com aquests sistemes s'estructuren i evolucionen en el temps. Amb l'ajut dels ordinadors podem comprovar si un hipotètic conjunt de regles ens pot menar a comportaments observats a la natura, i llavors podem utilitzar el nostre coneixement d'aquestes regles per a generar prediccions de diferents escenaris del tipus "què passaria si...?" Els ordinadors poden utilitzar-se també per analitzar quantitats massives de dades provinents dels sistemes complexos per així revelar i visualitzar patrons amagats que no són visibles a l'ull humà. Aquests mètodes computacionals poden portar-nos a descobriments que fan que el nostre coneixement i la nostra apreciació de la natura siguin més profunds.

EXEMPLES:

- Modelització basada en agents per a la formació de bandades d'ocells
- Models matemàtics i computacionals del cervell
- Models computacionals de predicció meteorològica
- Models computacionals de dinàmica de vianants

CONCEPTES RELLEVANTS:

Modelització, simulació, anàlisi de dades, metodologia, modelització basada en agents, anàlisi de xarxes, teoria de jocs, visualització, regles, comprensió.

REFERÈNCIES:

Pagels, Heinz R.

The Dreams of Reason: The Computer and the Rise of the Sciences of Complexity [Els somnis de la raó: l'ordinador i el creixement de les ciències de la complexitat]. Bantam Books, 1989.

Sayama, Hiroki.

Introduction to the Modeling and Analysis of Complex Systems [Introducció a la modelització i anàlisi dels sistemes complexos]. Open SUNY Textbooks, 2015.



“Crec que el proper [21è] segle serà el segle de la complexitat.”

– Stephen Hawking

COL·LABORADORS

Manlio De Domenico*, Dirk Brockmann, Chico Camargo, Carlos Gershenson, Daniel Goldsmith, Sabine Jeschonnek, Lorren Kay, Stefano Nichele, José R. Nicolás, Thomas Schmickl, Massimo Stella, Josh Brandoff, Ángel José Martínez Salinas, Hiroki Sayama*

(* Correspondència)

`mde Domenico[at]fbk.eu`

`sayama[at]binghamton.edu`

CRÈDITS

Dissenyat i editat per: *Serafina Agnello*

✉ `serafina.agnello[at]gmail.com`

in [Serafina Agnello](#)

lloc web:

<https://complexityexplained.github.io/>

Gràcies especials als següents per les seves aportacions i comentaris:

Hayford Adjavor, Alex Arenas, Yaneer Bar-Yam, Rogelio Basurto Flores, Michele Battle-Fisher, Anton Bernatskiy, Jacob D. Biamonte, Victor Bonilla, Dirk Brockmann, Victor Buendia, Seth Bullock, Simon Carrignon, Xubin Chai, Jon Darkow, Luca Dellanna, David Rushing Dewhurst, Peter Dodds, Alan Dorin, Peter Eerens, Christos Ellinad, Diego Espinosa, Ernesto Estrada, Nelson Fernández, Len Fisher, Erin Gallagher, Riccardo Gallotti, Pier Luigi Gentili, Lasse Gerrits, Nigel Goldenfeld, Sergio Gómez, Héctor Gómez-Escobar, Alfredo González-Espinoza, Marcus Guest, J. W. Helkenberg, Stephan Herminghaus, Enrique Hernández-Zavaleta, Marco A. Javarone, Hang-Hyun Jo, Pedro Jordano, Abbas Karimi, J. Kasmire, Erin Kenzie, Tamer Khraisha, Heetae Kim, Bob Klapetzky, Brennan Klein, Karen Kommerce, Roman Koziol, Roland Kupers, Erika Legara, Carl Lipo, Oliver Lopez-Corona, Yeu Wen Mak, Vivien Marmelat, Steve McCormack, Dan Mønster, Alfredo Morales, Yamir Moreno, Ronald Nicholson, Enzo Nicosia, Sibout Nooteboom, Dragan Okanovic, Charles R Paez, Julia Poncela C., Francisco Rodrigues, Jorge P. Rodríguez, Iza Romanowska, Pier Luigi Sacco, Joaquín Sanz, Samuel Scarpino, Alice Schwarze, Nasser Sharareh, Keith Malcolm Smith, Ricard Sole, Keith Sonnenburg, Cédric Sueur, Ali Sumner, Michael Szell, Ali Tareq, Adam Timlett, Ignacio Toledo, Leo Torres, Paul van der Cingel, Ben van Lier, Jeffrey Ventrella, Alessandro Vespignani, Joe Wasserman, Kristen Weiss, Daehan Won, Phil Wood, Nicky Zachariou, Mengsen Zhang, Arshi, Brewingsense, Complexity Space Consulting, Raoul, Systems Innovation, The NoDE Lab.

Traductors de la versió en català:

Albert Diaz-Guilera, Irene Ferri, M. Àngels Massip, Jordi Soriano, Sara Teller.



Serafina Agnello

Versió 1.0 (13 de maig de 2019) (En anglés)

Traducció al català: 4 d'octubre de 2019.