



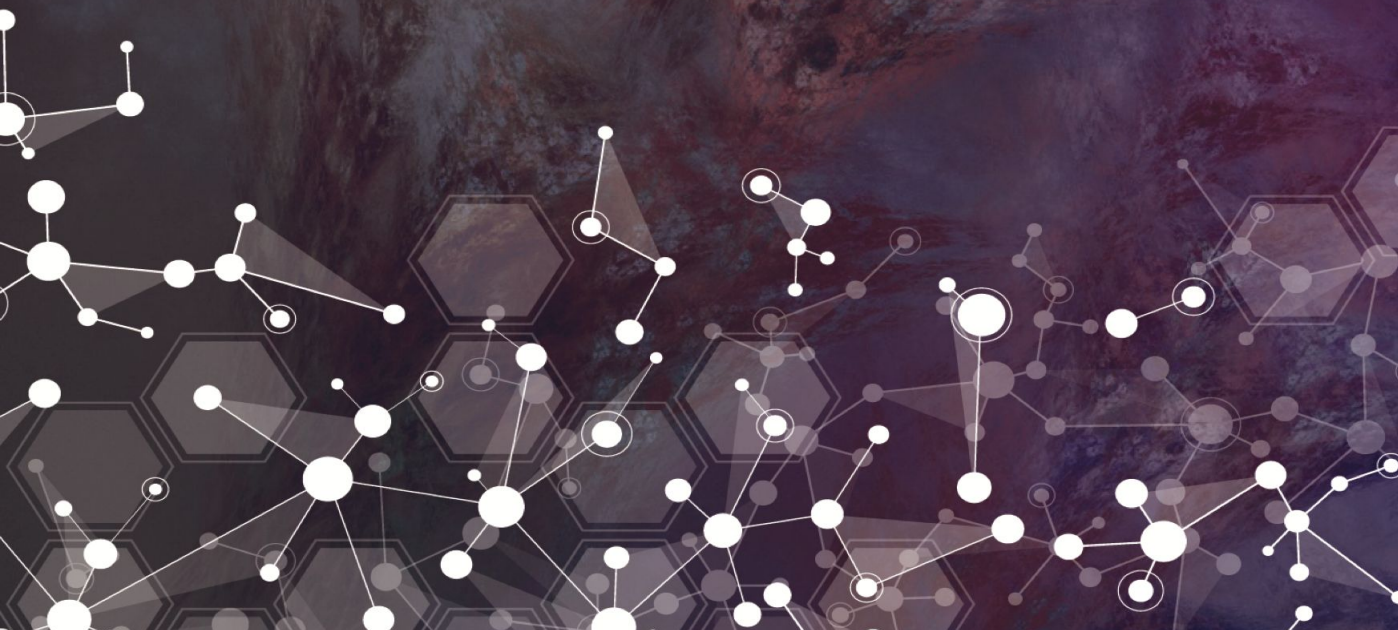
# COMPLEJIDAD EXPLICADA

*#ComplejidadExplicada*  
*#ComplexityExplained*

---

# TABLA DE CONTENIDOS

<b>1</b>	Interacciones	4
<b>2</b>	Emergencia	6
<b>3</b>	Dinámica	8
<b>4</b>	Auto-organización	10
<b>5</b>	Adaptación	12
<b>6</b>	Interdisciplinariedad	14
<b>7</b>	Métodos	16



# COMPLEJIDAD EXPLICADA



*"No hay amor en un átomo de carbono,  
ni huracán en una molécula de agua,  
ni colapso financiero en un billete de un dólar."  
– Peter Dodds*

Las ciencias de la complejidad, también llamadas ciencias de sistemas complejos, estudian la forma en que grandes conjuntos de componentes - interactuando localmente entre sí a pequeña escala - pueden espontáneamente auto-organizarse y presentar estructuras globales y comportamientos no-triviales a mayores escalas, sin intervención externa, autoridad central o líderes que determinen el comportamiento colectivo. Las propiedades del todo pueden no ser entendidas o predichos a partir del conocimiento total de cada una de sus partes. Las colecciones de elementos que presentan estas propiedades es un sistema complejo, y requiere de nuevos marcos matemáticos y métodos científicos para ser estudiado.

Aquí presentamos algunas cosas que debes saber acerca de los sistemas complejos.





# INTERACCIONES

LOS SISTEMAS COMPLEJOS CONSISTEN DE MÚLTIPLES COMPONENTES INTERACTUANDO ENTRE SÍ Y CON SU ENTORNO DE MUCHAS MANERAS.

---



*"Cualquier objeto estudiado por la biología es un sistema de sistemas."*

*- Francois Jacob*

Los sistemas complejos suelen caracterizarse por tener muchos componentes que interactúan de formas múltiples entre sí y potencialmente con su entorno. Estas partes forman redes de interacciones, a veces con unos pocos componentes involucrados en muchas interacciones. Las interacciones pueden generar información nueva que complica el estudio individual de las partes o la predicción correcta de su futuro. Adicionalmente, los componentes de un sistema pueden también ser nuevos sistemas, es decir, sistemas de sistemas interdependientes entre sí. El mayor reto de las ciencias de la complejidad no es sólo apreciar las partes y sus conexiones, sino también entender cómo estas interacciones dan lugar al todo.

## EJEMPLOS:

- Billones de neuronas interactuando en el cerebro humano.
- Computadores comunicándose en el Internet.
- Humanos en relaciones multifacéticas.

## CONCEPTOS RELEVANTES:

Sistema, componente, interacciones, red, estructura, heterogeneidad, interrelación, interconexión, interdependencia, subsistemas, fronteras, ambiente, sistemas abiertos/cerrados, sistemas de sistemas.

## REFERENCIAS:

Mitchell, Melanie.

*Complexity: A Guided Tour*

[Complejidad: un recorrido guiado].

Oxford University Press, 2009.

Capra, Fritjof and Luisi, Pier Luigi.

*The Systems View of Life: A Unifying Vision*

[El enfoque sistémico de la vida: una perspectiva unificadora].

Cambridge University Press, 2016.



# EMERGENCIA

LAS PROPIEDADES DE LOS SISTEMAS COMPLEJOS EN SU CONJUNTO SON MUY DIFERENTES, Y A MENUDO MÁS INESPERADAS, QUE LAS PROPIEDADES DE SUS COMPONENTES INDIVIDUALES.

---

*“No necesitas algo más para obtener algo más. Eso es lo que significa emergencia.”*

*- Murray Gell-Mann*

En sistemas simples, las propiedades del conjunto pueden entenderse o predecirse a partir de la suma o agregación de sus componentes. En otras palabras, las propiedades macroscópicas de un sistema simple pueden deducirse de las propiedades microscópicas de sus partes. Sin embargo, en sistemas complejos las propiedades del conjunto a menudo no pueden entenderse ni predecirse a partir del conocimiento de sus componentes, debido a un fenómeno conocido como “emergencia”. Este fenómeno involucra diversos mecanismos que, a través de la interacción entre los componentes de un sistema, generan información nueva y exhiben tanto estructuras como comportamientos colectivos no triviales a escalas más grandes. Este hecho generalmente se resume con la frase popular “el todo es más que la suma de sus partes”.

## EJEMPLOS:

- Una cantidad masiva de moléculas de aire y vapor formando un tornado.
- Múltiples células formando un organismo.
- Billones de neuronas en un cerebro produciendo conciencia e inteligencia.

## CONCEPTOS RELEVANTES:

Emergencia, escalas, no-linealidad, de abajo hacia arriba, descripción, sorpresa, efectos indirectos, no intuitivo, transición de fase, irreducibilidad, ruptura del pensamiento lineal/estadístico tradicional, "el todo es más que la suma de sus partes".

## REFERENCIAS:

Bar-Yam, Yaneer.

*Dynamics of Complex Systems*

[Dinámica de sistemas complejos].

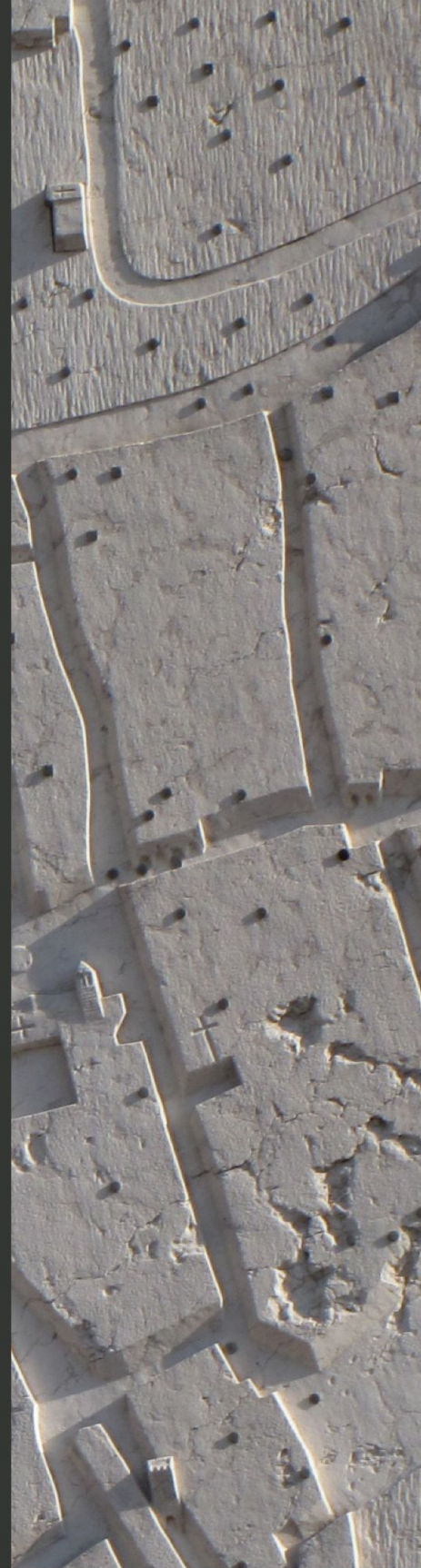
Addison-Wesley, 1997.

Ball, Philip.

*Critical Mass: How One Thing Leads to Another*

[Masa crítica: cómo una cosa lleva a otra].

Macmillan, 2004.



# DINÁMICA

LOS SISTEMAS COMPLEJOS TIENDEN A CAMBIAR DINÁMICAMENTE SUS ESTADOS, A MENUDO EXHIBIENDO ALGÚN TIPO DE COMPORTAMIENTO IMPREDECIBLE A LARGO PLAZO.

---

*“Caos: Cuando el presente determina el futuro, pero un presente aproximado no determina aproximadamente el futuro.”*

*- Edward Lorenz*

Los sistemas pueden ser analizados en términos de cómo cambian sus estados en el tiempo. Un estado se describe en términos de conjuntos de variables que caracterizan dicho sistema de la mejor manera. A medida que el sistema cambia sus variables también lo hacen, habitualmente respondiendo a su entorno. Este cambio se denomina lineal si es directamente proporcional al tiempo, al estado actual del sistema o a cambios en el entorno; o no lineal si no es proporcional a ellos. Los sistemas complejos son típicamente no lineales y cambian a diferentes velocidades dependiendo de sus estados y su entorno. También pueden tener estados estables en los que pueden permanecer aún si son perturbados, o inestables en los que los sistemas pueden ser alterados por una pequeña perturbación. En algunos casos, pequeños cambios en el entorno pueden cambiar completamente el comportamiento del sistema, un fenómeno conocido como bifurcaciones, transiciones de fase o puntos de quiebre.



Algunos sistemas son “caóticos”, es decir, extremadamente sensibles a pequeñas perturbaciones, e impredecibles a largo plazo; exhibiendo así el famoso “efecto mariposa”. Un sistema complejo también puede depender de su trayectoria, es decir, su estado futuro depende no sólo de su estado actual, sino también de su pasado.

### **EJEMPLOS:**

- El clima cambiando constantemente de manera impredecible.
- La volatilidad financiera de los mercados financieros.

### **CONCEPTOS RELEVANTES:**

Dinámica, comportamiento, no-linealidad, caos, no-equilibrio, sensibilidad, efecto mariposa, bifurcación, impredecibilidad a largo plazo, incertidumbre, dependencia en la trayectoria/contexto, no-ergodicidad.

### **REFERENCIAS:**

Strogatz, Steven H.  
*Nonlinear Dynamics and Chaos*  
[Dinámica no-lineal y caos].  
CRC Press, 1994.

Gleick, James.  
*Chaos: Making a New Science*  
[Caos: la creación de una ciencia].  
Open Road Media, 2011.



# AUTO-ORGANIZACIÓN

LOS SISTEMAS COMPLEJOS SE PUEDEN AUTO-ORGANIZAR PARA PRODUCIR PATRONES NO TRIVIALES DE MANERA ESPONTÁNEA SIN UN PLAN.

---

*“Se sugiere que un sistema de sustancias químicas, llamados morfógenos, reaccionando entre sí y en difusión a través de un tejido, es adecuado para describir los fenómenos principales de la morfogénesis”*

*– Alan Turing*

Las interacciones entre los componentes de un sistema pueden producir un patrón o comportamiento globales. Esto puede describirse como auto-organización, ya que no hay un control central o externo. Más bien, el “control” de un sistema auto-organizante está distribuido entre componentes y se integra a través de sus interacciones. La auto-organización puede producir estructuras físicas/funcionales como patrones cristalinos de materiales y morfologías de organismos vivos o bien, comportamientos dinámicos/informacionales como los de cardúmenes de peces y patrones eléctricos propagándose en músculos de animales. Al incrementarse la organización del sistema mediante este proceso, nuevos patrones de interacción pueden emerger en el tiempo, potencialmente llevando a la producción de mayor complejidad. En algunos casos, los sistemas complejos pueden auto-organizarse hacia un estado “crítico” que sólo podría existir manteniendo un sutil balance entre aleatoriedad y regularidad.

Los patrones que surgen en tales estados críticos auto-organizados comúnmente muestran diversas propiedades peculiares, tales como auto-similitud y distribuciones de leyes de potencia de propiedades de patrones.

### EJEMPLOS:

- Una célula cigoto dividiéndose y eventualmente auto-organizándose en la forma compleja de un organismo.
- Ciudades creciendo al atraer más habitantes y dinero.
- Una población grande de aves (e.g. estorninos) mostrando patrones complejos de parvada.

### CONCEPTOS RELEVANTES:

Auto-organización, comportamiento colectivo, enjambres (*swarm*), patrones, espacio y tiempo, orden de desorden, criticalidad, auto-similitud, ráfaga (*burst*), criticalidad auto-organizada, leyes de potencia, distribuciones de cola larga (*heavy-tailed*), morfogénesis, control descentralizado o distribuido, auto-organización guiada.

### REFERENCIAS:

Ball, Philip. *The Self-Made Tapestry: Pattern Formation in Nature* [El tapiz auto-creado: formación de patrones en la naturaleza]. Oxford University Press, 1999.

Camazine, Scott, et al. *Self-Organization in Biological Systems* [Auto-organización en sistemas biológicos]. Princeton University Press, 2003.



# AUTO-ORGANIZACIÓN 4



# ADAPTACIÓN

LOS SISTEMAS COMPLEJOS PUEDEN ADAPTARSE Y EVOLUCIONAR.

---

*“En biología nada tiene sentido, excepto cuando es visto bajo la luz de la evolución”*  
- Theodosius Dobzhansky

Los sistemas complejos, con frecuencia, se encuentran activos y responden al ambiente donde se encuentran, en vez de simplemente tratar de alcanzar un estado asintótico estable - esta es la diferencia entre una esfera que rueda hasta el fondo de una pendiente y se detiene, y un pájaro que, en pleno vuelo, se adapta a las corrientes de viento. Esta adaptación puede ocurrir en múltiples escalas: cognitiva, a través del aprendizaje y del desarrollo psicológico; social, al compartir información con nuestro entorno social; y aún también evolutiva, mediante la mutación genética y la selección natural. Cuando los componentes de estos sistemas se descomponen o son eliminados, con frecuencia son capaces de adaptarse y recuperar su grado de funcionamiento previo, y en ocasiones mejorarse a sí mismos. Esto se logra debido a la robustez, la habilidad de resistir a las perturbaciones; la resiliencia, la habilidad de recuperar el estado original luego de una perturbación prolongada; o la adaptación, la habilidad que tiene el sistema para auto-recuperarse a fin de mantenerse funcional y sobrevivir. Los sistemas complejos que poseen estas propiedades son conocidos como sistemas complejos adaptativos.

## EJEMPLOS:

- El sistema inmunológico continuamente aprendiendo cómo reaccionar ante nuevos patógenos.
- Una colonia de termitas que reparan su nido luego de sufrir daños.
- La vida en la tierra que ha sobrevivido a numerosas catástrofes a lo largo de millones de años de historia.

## CONCEPTOS RELEVANTES:

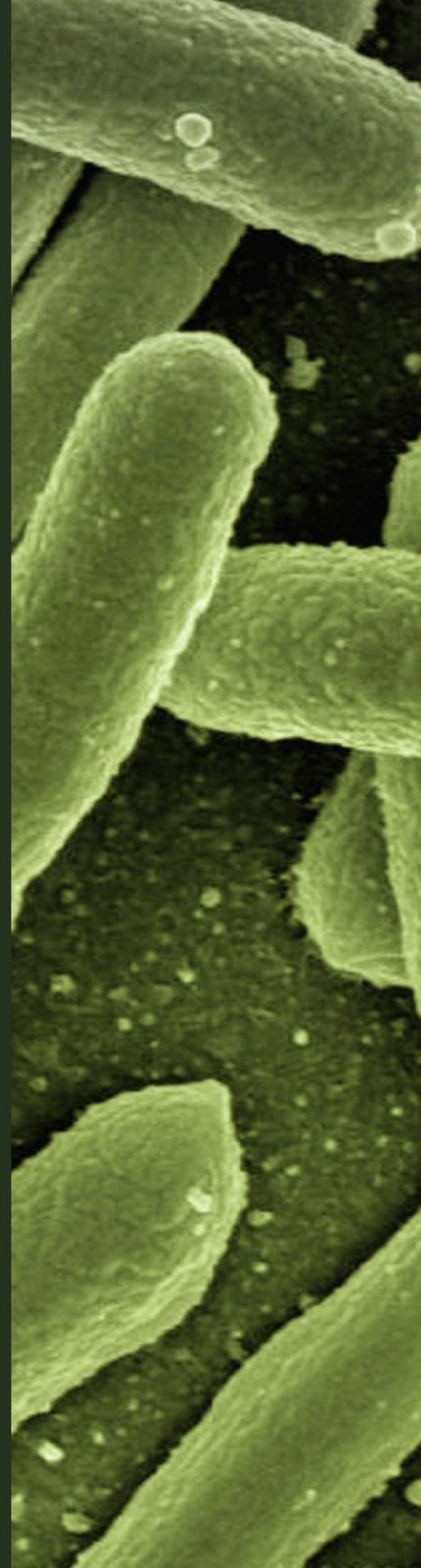
Aprendizaje, adaptación, evolución, paisaje adaptativo (*fitness landscapes*), robustez, resiliencia, diversidad, sistemas complejos adaptativos, algoritmos genéticos, vida artificial, inteligencia artificial, inteligencia colectiva o de enjambre (*swarm intelligence*), creatividad, apertura sin fin (*open-endedness*).

## REFERENCIAS:

Holland, John Henry.  
*Adaptation in Natural and Artificial Systems*  
[Adaptación en sistemas naturales y artificiales]. MIT press, 1992.

Solé, Ricard y Elena, Santiago F. *Viruses as Complex Adaptive Systems* [Los virus como sistemas complejos adaptativos]. Princeton University Press, 2018.

# ADAPTACIÓN 5





# INTERDISCIPLINARIEDAD

LAS CIENCIAS DE LA COMPLEJIDAD PUEDEN UTILIZARSE PARA ENTENDER Y TRATAR UNA GRAN VARIEDAD DE SISTEMAS EN MUCHOS ÁMBITOS.

---

*“Puede que la búsqueda de propiedades en común entre diversos tipos de sistemas complejos no sea totalmente en vano... Las ideas de retroalimentación e información proveen un marco de referencia para considerar un amplio rango de situaciones.”*

– Herbert Simon

Los sistemas complejos aparecen en todos los ámbitos científicos y profesionales, incluyendo física, biología, ecología, ciencias sociales, finanzas, negocios, administración, política, psicología, antropología, medicina, ingeniería, tecnología de la información, y otros. Muchas de las últimas tecnologías, desde las redes sociales y tecnologías móviles hasta vehículos autónomos y blockchain, producen sistemas complejos con propiedades emergentes que son esenciales para entender y predecir el bienestar de la sociedad. Un concepto clave de las ciencias de complejidad es la universalidad, la idea de que muchos sistemas en diversos ámbitos presentan fenómenos con características en común que pueden ser descritas usando los mismos modelos científicos. Estos conceptos justifican un nuevo marco de referencia matemático/computacional multidisciplinario.

Las ciencias de la complejidad pueden proveer un enfoque comprensivo y transdisciplinario que complementa alcances científicos tradicionales que se concentran en temas específicos en cada ámbito.

### **EJEMPLOS:**

- Propiedades en común de varios sistemas de procesamiento de información (sistemas nerviosos, el Internet, infraestructura de comunicación).
- Patrones universales en varios procesos de difusión (epidemias, modas, incendios forestales).

### **CONCEPTOS RELEVANTES:**

Universalidad, aplicaciones varias, multi-/inter-/cros-/trans- disciplinariedad, economía, sistemas sociales, ecosistemas, sostenibilidad, solución de problemas del mundo real, sistemas culturales, relevante para la toma de decisiones de la vida diaria.

### **REFERENCIAS:**

Turner, Stefan, Hanel, Rudolf and Klimek, Peter. *Introduction to the Theory of Complex Systems* [Introducción a la teoría de sistemas complejos]. Oxford University Press, 2018.

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



# MÉTODOS

LOS MÉTODOS MATEMÁTICOS Y COMPUTACIONALES SON HERRAMIENTAS PODEROSAS PARA EL ESTUDIO DE LOS SISTEMAS COMPLEJOS.

---



*"Todos los modelos están mal, pero algunos son útiles."*  
- George Box

Los sistemas complejos involucran muchas variables y configuraciones que no pueden ser exploradas con la intuición mediante cálculos simples usando papel y lápiz. En vez de ello es necesario casi siempre incorporar la modelación matemática y computacional, combinando una aproximación analítica con simulaciones para poder entender cómo este tipo de sistemas se estructuran y cambian en el tiempo. Con la ayuda de computadoras se puede probar si un conjunto específico de reglas hipotéticas genera efectivamente los comportamientos observados en la naturaleza, y luego el conocimiento de esas reglas puede usarse para generar predicciones de distintos escenarios del estilo "qué pasaría si...". Las computadoras también pueden ser usadas para analizar los grandes volúmenes de datos que típicamente producen los sistemas complejos de tal manera que se pueden revelar y visualizar los patrones inherentes del sistema que suelen estar ocultos al ojo humano. Estos métodos computacionales pueden conducir a descubrimientos que ayuden a profundizar nuestra comprensión y apreciación de la naturaleza.



## EJEMPLOS:

- Modelado basado en agentes de parvadas de aves (flocking).
- Modelos matemáticos y computacionales del cerebro.
- Predicción del clima con modelos computacionales.
- Modelos computacionales de la dinámica de peatones.

## CONCEPTOS RELEVANTES:

Modelado, simulación, análisis de datos, metodología, modelado basado en agentes, análisis de redes, teoría de juegos, visualización, reglas, entendimiento.

## REFERENCIAS:

Pagels, Heinz R.

*The Dreams of Reason: The Computer and the Rise of the Sciences of Complexity* [Los sueños de la razón: la computadora y el advenimiento de las ciencias de la complejidad]. Bantam Books, 1989.

Sayama, Hiroki.

*Introduction to the Modeling and Analysis of Complex Systems* [Introducción al modelado y análisis de sistemas complejos]. Open SUNY Textbooks, 2015.



*“Pienso que el siguiente siglo [XXI]  
será el siglo de la complejidad.”  
– Stephen Hawking*

## COLABORADORES

Manlio De Domenico\*, 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\*

\*Correspondencia:  
mdedomenico[at]fbk.eu  
sayama[at]binghamton.edu

## CRÉDITOS

Diseñado y editado por: ***Serafina Agnello***

✉ serafina.agnello[at]gmail.com

**in** [Serafina.Agnello](https://www.linkedin.com/in/Serafina.Agnello)

Sitio web:

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

Agradecimientos especiales a los siguientes que proporcionaron propuestas y retroalimentación:

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.

### **Traductores de la versión en Español:**

**Valerie C. Valerio Holguín, Carlos Gershenson, José Luis Herrera, Johann H. Martínez, Manuel Rueda Santos, Oliver López Corona, Guillermo de Anda Jáuregui, Gerardo Iñiguez, Alfredo J. Morales Guzmán, José R. Nicolás Carlock.**



***Serafina Agnello***

*Versión 1.0 (13 de mayo de 2019) (En Inglés)*

*Traducción al Español: 13 de julio de 2019.*