

Elena Álvarez-Buylla* y Alejandro Frank Hoefflich*

El Centro de Ciencias de la Complejidad de la UNAM: Piedra de Roseta para la ciencia en México

Resumen | El presente artículo explica el surgimiento del enfoque de la complejidad ante las carencias de la ciencia reduccionista, no obstante sus notables éxitos en el conocimiento de la materia y en el desarrollo tecnológico derivado del mismo. Se expone el fenómeno de la *emergencia* a partir del reconocimiento de niveles jerárquicos de organización dentro de la ciencia y se describen los sistemas complejos, destacando que las interacciones de las partes que los componen implican comportamientos que generan información adicional, usualmente oculta al observador. Por otro lado, se discuten las barreras para acceder a la *transdisciplina*, resaltando la dificultad de comunicación entre las especialidades debida a la existencia de lenguajes, métodos e ideas diferentes. Respecto a la posibilidad de explorar mejores formas de comunicación entre especialistas para incidir en la solución de problemas complejos se expone el origen y las perspectivas del Centro de Ciencias de la Complejidad (C3) de la UNAM.

The Complexity Sciences Center at UNAM, Rosetta Stone for Science in Mexico

Abstract | This paper attempts to chronicle the development of approaches linked to complexity, designed to overcome the shortcomings of reductionist science, without demeriting its unquestionable successes in the investigation of matter and the technological developments derived thereof. We outline the phenomenon of emergence, and the recognition of hierarchical levels of organization within science, and we describe complex systems, highlighting the fact that interactions between parts of these systems involve behaviors that generate additional information, that can be hidden from the observer. On the other hand, we discuss the obstacles to achieving transdisciplinarity, stressing the difficulty of communication between disciplines, due to the existence of different languages, methods and conceptions. Concerning the possibility of exploring better ways and means of communication among specialists as a contribution towards the solution of complex problems, we recount the origins and prospects of the Center for Complex Science (known as C3, according to its Spanish initials) at the Mexico National Autonomous University (UNAM).

* Integrantes del Consejo Directivo del Centro de Ciencias de la Complejidad–UNAM.
Correos electrónicos: eabullya@gmail.com y frank@nucleares.unam.mx

Palabras clave | ciencia reduccionista – complejidad – emergencia – ciencia integrativa – sistemas complejos

Keywords | reductionist science – complexity – emergency – integrative science – complex systems

EN LA CIENCIA han convivido enfoques separados para entender los fenómenos de la naturaleza viva y la inanimada. Por muchos años la ciencia de frontera más respetada era aquella que, fundamentalmente, se derivaba de enfoques reduccionistas, en los que el análisis cuidadoso, teórico y experimental de componentes aislados de los sistemas bajo estudio se llevaba a cabo con mucho detalle, bajo la premisa de que los hallazgos hechos en los componentes aislados, o en interacción con algunos pocos componentes adicionales, podría extrapolarse para entender el comportamiento de los sistemas integrados.

Tal vez el primer enfoque moderno que hacía explícitas las carencias de esta metodología fue el de los economistas, que se percataron de que el comportamiento en los mercados parecía producirse espontáneamente a partir de la acción de muchos factores, pero no como resultado de un plan predeterminado. (Ferguson 1767; Colander 2000). En particular F. Hayek (1978), economista y filósofo, fue pionero del enfoque complejo que influyó sobre muchos otros personajes, como G. Bateson (1995) e Ilya Prigogine (1997). Este último jugó un papel de gran importancia para que, en particular, los físicos empezaran a prestar atención a un nuevo paradigma.

El 4 de agosto de 1972, Philip W. Anderson, publicó en la revista *Science* un artículo que habría de tener una gran repercusión en los círculos académicos, en cuanto a la visión que a partir de entonces tendrían los científicos sobre la naturaleza (1972). Hasta ese momento seguía prevaleciendo en el mundo la filosofía reduccionista de la ciencia; es decir, la idea de que un pequeño número de fuerzas fundamentales en el universo son responsables del comportamiento de la materia, tanto inanimada como viva, y que la ciencia en su conjunto podría entonces dividirse en aquella dedicada a desentrañar los detalles de las mismas (la ciencia *fundamental*) y aquella que *solamente* tendría que buscar la manera de utilizar estas leyes para explicarlo todo.

El artículo, cuyo título es *More is Different*, o *Más es Diferente*, contiene una argumentación detallada de cómo este paradigma resulta falaz e insuficiente: la capacidad para reducir los fenómenos a sus componentes y leyes más simples no implica que pueda llevarse a cabo el proceso inverso, es decir, la posibilidad de deducir a partir de estas leyes el comportamiento del universo. No es posible, por ejemplo, explicar el comportamiento de un cristal a partir de la física de las partículas elementales, ni el de la biología molecular a partir de la química,

ni, siguiendo este razonamiento, el desarrollo y formación de patrones celulares en los seres vivos a partir del comportamiento de genes o células aisladas. Incluso, tampoco es posible entender el comportamiento de toda una sociedad a partir de la psicología, que a su vez no es explicable a partir de la fisiología del cerebro. De este modo Anderson definió el fenómeno de la *emergencia*, o la existencia de niveles jerárquicos en la ciencia, cada uno de los cuales requiere de sus propios principios fundamentales, independientes de los niveles anteriores. Para poder entender la complejidad creciente, se requiere escalar hacia jerarquías superiores, donde resulta necesario plantearse la pregunta básica de cómo es posible unir las partes de un nivel o jerarquía dentro del nivel inmediatamente superior para entender los nuevos comportamientos que pueden resultar (o *emerger*). La arrogante frase atribuida a Paul Dirac, descubridor del positrón, “lo demás es química”, ha quedado atrás, pero aún hoy hay quienes parecen creer que se puede reducir al organismo humano y su comportamiento a la química o a la genética.

Los descubrimientos recientes de la epigenética empiezan a desentrañar de manera más detallada el complejo entrelazamiento y la retroalimentación dinámica entre genética y medio ambiente (McCarthy 2013). Ilya Prigogine y Philip W. Anderson, quienes recibieron sendos Premios Nobel de Física por su trabajo, son considerados como dos de los pioneros de lo que hoy llamamos las *Ciencias de la Complejidad*.

Uno de los retos de las ciencias contemporáneas surge justamente de la biología. Siguiendo el enfoque reduccionista, se pensó que el contar con las secuencias de los genomas completos permitiría entender cómo se “ensamblan” los seres vivos a partir de sus componentes fundamentales: los genes. Sin embargo, esto no ha sido posible. Ahora contamos con una gran cantidad de información sobre genes, proteínas, metabolitos, etc. Pero no somos capaces de comprender o de predecir, por ejemplo, cómo y por qué emerge o surge una enfermedad. Mucho menos aún somos capaces de entender a cabalidad cómo emergen los patrones vivos a nivel de los tejidos, los órganos o los seres vivos completos.

El Centro de Ciencias de la Complejidad de la UNAM es un proyecto que busca una manera diferente de hacer ciencia, donde se promueva la investigación a distintos niveles de organización, desde lo micro hasta lo macro, y con la integración de muy diversas disciplinas y del uso de herramientas formales y computacionales de los sistemas complejos

Entre los teóricos de las ciencias de la complejidad destaca Stuart Kauffman (1993;1995), quien ya en la década de 1960 propuso que la diferenciación celular se podría estudiar formalmente como un fenómeno emergente de las interacciones no lineales y de la acción concertada de un conjunto de genes. En lugar de encontrar la acción de un solo gene para cada tipo o comportamiento celular, Kauffman predijo que las configuraciones estacionarias a las que llega una red de interacciones genéticas, en donde algunos genes permanecen encendidos de manera estable y otros están inactivos, corresponden a las combinaciones de actividad genética que caracterizan a cada tipo celular. Esta predicción se ha podido comprobar experimentalmente en diversos sistemas biológicos. En investigaciones que fueron pioneras en impulsar la iniciativa del C3 y que ahora se siguen desarrollando, se ha demostrado, por ejemplo, que los tipos celulares primordiales que caracterizan a todas las flores y que eventualmente dan lugar a sus órganos típicos —sépalos, pétalos, estambres y carpelos— se establecen como resultado de las interacciones de un conjunto de genes que se expresan durante los estados tempranos del desarrollo floral (Espinosa-Soto, Padilla-Longoria y Álvarez-Buylla 2004). Este sistema resulta paradigmático en estudios de sistemas complejos y ha inspirado otros en sistemas animales, en hongos, e inclusive en procesos celulares en el ser humano.

El término “complejidad” intenta reflejar el comportamiento de sistemas en los que inciden numerosas variables. Un sistema complejo está compuesto generalmente por partes interconectadas o entrelazadas, cuyas interacciones implican comportamientos que generan información adicional, usualmente oculta al observador. Como resultado de las interacciones entre sus elementos, surgen propiedades nuevas (denominadas emergentes) que no pueden explicarse a partir de las propiedades de los elementos aislados. De nuevo, y para citar un ejemplo concreto, en el caso de los tipos celulares que dan lugar a los órganos de la flor se requiere entender cómo se establecen estos tipos celulares y cómo se mantienen de manera robusta, no sólo durante el desarrollo de una flor dada, sino incluso durante la diferenciación de los órganos florales que ocurre en las plantas bajo cualquier condición ambiental. En este caso, la emergencia robusta de los cuatro tipos celulares y no de otros, es un comportamiento emergente de la interacción de los genes.

A otro nivel de organización, un sistema ecológico, por ejemplo, es también un sistema complejo con propiedades emergentes, impredecibles a partir de sus componentes que son las distintas especies, o los elementos del ambiente. Además, si una de sus partes se altera ligeramente, el sistema en su totalidad puede sufrir cambios muy grandes y reaccionar de modo impredecible. Este cambio, si se da, depende de las interacciones de los componentes afectados y la topología de la totalidad de la red ecológica bajo estudio.

Para ser capaz de abordar problemáticas concretas, el estudio de los sistemas complejos requiere entonces de una ciencia integrativa, que logre trascender las barreras disciplinarias. Pero también se requiere de la ciencia reduccionista que es instrumental para generar datos de los componentes y sus interacciones. Por ello el análisis de los sistemas complejos necesita tanto de una ciencia que involucre procesos integrados, con enfoques dinámicos y sistémicos, como de un enfoque que permita recabar datos e información sobre los componentes aislados. Esto implica, además, que deben concurrir múltiples disciplinas y que la ciencia integrativa necesaria en el estudio de sistemas complejos debe romper con la atomización, la rigidez y aislamiento disciplinarios, que además dificultan la transferencia de conocimientos, imprescindible en una ciencia integrativa. Las grandes problemáticas y sus soluciones requieren de una ciencia con enfoques de sistemas complejos y herramientas para llevar a cabo análisis globales dinámicos. Este tipo de ciencia también debe ser la base para enfoques propositivos e innovadores, pero también para una ciencia profunda y preventiva, tan necesaria como urgente en salud, ambiente, y aspectos relevantes para la organización social y económica.

En la mayoría de las universidades y centros de investigación en el mundo aún prevalece, sin embargo, un modelo “disciplinario” y reduccionista; es decir, la fragmentación del conocimiento en áreas cada vez más especializadas sobre componentes cada vez más pequeños o fundamentales, y en general aislados de sus contextos e interacciones. Este enfoque, sin duda, ha tenido un notable éxito que nos ha llevado, por ejemplo, a develar la estructura de la materia en sus componentes más fundamentales y al desarrollo de modernas tecnologías que hacen uso de estos conocimientos.

Este enfoque y tendencia a la atomización han empezado a chocar con sus propios límites debido, en parte, a su propio éxito. Al extender de manera espectacular el conocimiento, ha empezado a cobrar conciencia de que los avances, en muchos campos, conducen indefectiblemente a una complejidad que la especialización no puede resolver sola. Por ello, es importante ensayar mecanismos que permitan los enfoques integrados de varias ramas de la ciencia relevantes para un problema dado, favoreciendo la emergencia de nuevos conceptos, herramientas y visiones que nos permitan acceder a niveles de complejidad más altos. En cierto sentido, se requiere una Piedra Roseta para la ciencia.

La piedra Roseta es un fragmento de estela egipcia con un manifiesto, grabado en la piedra, que proporcionó la clave para descifrar los jeroglíficos egipcios. El texto registra un decreto que fue expedido en Menfis, capital del viejo imperio, en el año 196 antes de Cristo. Se trata de tres versiones del mismo texto que utilizan diferentes símbolos: jeroglíficos egipcios, escritura demótica egipcia y griego antiguo. El monolito, descubierto en 1799 y actualmente en el

Museo Británico, se ha convertido en símbolo universal de comunicación entre culturas y pueblos.¹ Más de dos milenios después de grabado ese texto, nos hemos encontrado con un serio problema de comunicación entre las diferentes disciplinas del conocimiento. Como mencionábamos antes, cada una de ellas ha desarrollado sus propios códigos, procedimientos y lenguajes, haciendo muy difícil el diálogo productivo. Al mismo tiempo, los científicos se han hecho conscientes de las limitaciones que implica intentar resolver problemas asociados a nuestro intrincado mundo actual, a partir de enfoques disciplinarios; es decir, a través de la visión de una sola ciencia o disciplina, ya que la mayoría de los problemas que enfrentamos hoy en día son de naturaleza compleja. El cambio climático, las enfermedades infecciosas como el paludismo, las causas del cáncer y otros retos de salud pública, el acceso y conservación de las fuentes de agua, la energía, el urbanismo, la educación, la criminalidad, los problemas ambientales y, en general, las problemáticas que enfrenta la sociedad actual requieren para su solución de este nuevo paradigma. Esta situación no se refiere solamente a las diferentes disciplinas de las ciencias básicas, sino también a las ingenierías y a la tecnología, así como a las ciencias sociales y a la vinculación con el sector público y el sector productivo.

Con el propósito de buscar incidir de manera más relevante en la solución de los problemas complejos que enfrenta nuestro país, un grupo de investigadores de diversos institutos y facultades de la UNAM tuvo la iniciativa de crear el C3, que se inauguró oficialmente a fines de 2008 en la Torre de Ingeniería, moderno espacio situado en el corazón de Ciudad Universitaria de la UNAM. En él se ha buscado poner en práctica estas nuevas maneras de entender la ciencia, que comprende la interacción de los sistemas sociales y económicos con los fenómenos naturales, es decir, aquéllos que son tema de estudio de la física, la biología, la química y, en general, las ciencias naturales. El grupo de investigadores que inició el proyecto C3 estuvo originalmente integrado por físicos, matemáticos, biólogos y científicos de la computación, pero hoy en día participan otros especialistas, como ingenieros, médicos, veterinarios, tecnólogos, sociólogos y filósofos, que exploran las mejores formas de comunicarse entre sí dentro de este universo en el que cada quién habla su propio “idioma”.

En sus primeros cuatro años, el C3 ha logrado conformar una red de más de 300 investigadores y estudiantes de facultades, centros e institutos de la UNAM, así como de instituciones públicas y universidades de México y de otros países. Se pretende desarrollar así soluciones “tecnológicas” que, para alcanzar un mayor potencial, sean respaldadas por una ciencia básica de alto nivel. En el C3 se

1 Ver: http://es.wikipedia.org/wiki/Piedra_de_Roseta

han organizado diversos grupos que investigan desde aspectos muy fundamentales —como la estructura de redes de regulación genética que al alterarse de diversas maneras dan lugar a crecimientos cancerosos— hasta desarrollos tecnológicos que ya están siendo usados en el análisis y búsqueda de soluciones a problemáticas muy concretas, como el sistema en línea de monitoreo de enfermedades respiratorias *REPORTA*² y el sistema de auto-organización de semáforos y sistemas de transporte público.³

En estos problemas la ingeniería computacional juega un papel fundamental, dado que se buscan soluciones que involucren sistemas de predicción y toma de decisiones en problemas con un importante impacto social, como es el caso de las enfermedades emergentes (como la influenza A/H1N1), los efectos del cambio climático y el potencial para responder a él de las distintas variedades de maíz nativo de México, los análisis y escenarios de riesgo por la introducción de maíz transgénico, la prevención y/o expansión del enfermedades complejas como la diabetes y el cáncer y el estudio de métodos de diagnóstico y tratamiento de enfermedades asociadas con la vejez.

La convocatoria y las actividades del C3 hasta ahora han sido muy exitosas, por lo que se llegó a la conclusión de que es necesario contar con una adscripción formal en la estructura académico-administrativa de la UNAM, con un apoyo institucional para desarrollar plenamente sus planes, y con un espacio propio y adecuado para llevar a cabo sus funciones de manera eficaz. Lo ideal, se pensó, era que este espacio se ubicara en Ciudad Universitaria, en donde se encuentra la mayor concentración de investigadores, estudiantes y técnicos del país, que podrán participar activamente en esta iniciativa. Esto sin excluir la participación de personal académico de otros espacios universitarios de la UNAM y de otras Instituciones de investigación de México y del extranjero.

El grupo de científicos especialistas en el desarrollo y aplicación de los conceptos y herramientas de los sistemas complejos plantea también al C3 como una vía para establecer un intercambio profundo de conocimientos, conceptos y metodologías indispensables en la ciencia de frontera de los sistemas complejos.

Los problemas se plantean más allá de las vinculaciones entre diferentes ramas de la ciencia, sino que abarcan sectores completos, como por ejemplo la necesidad de dialogar provechosamente entre los científicos y los gobiernos

² reporta@c3.org.mx

³ <http://turing.iimas.unam.mx/~cgg/>

El C3 ha conformado hasta ahora cinco programas de investigación para desarrollar proyectos concretos con el enfoque de los Sistemas Complejos. Estos corresponden a las áreas generales de 1) Salud, 2) Biología Celular, 3) Ecología y Ciencias Ambientales, 4) Inteligencia Artificial, y 5) Ciencias Sociales. En estos programas se realizan y se han concretado ya contribuciones científicas básicas importantes. También se están enfilando algunos proyectos a contribuir al entendimiento y a la eventual solución o prevención de algunas problemáticas nacionales que requieren atención urgente.

Algunos temas específicos de investigación básica y aplicada, que están siendo ya desarrollados en el C3 desde el enfoque de las ciencias de la complejidad, son los siguientes: enfermedades emergentes (p. ej. el mal de Chagas y la

El planteamiento interdisciplinario implica un cambio bastante radical de la cultura de la investigación científica, que no se alcanzará de manera extensa en el corto plazo

influenza), factores causales, emergencia y posible prevención de enfermedades complejas como la diabetes tipo II y el cáncer, causas y prevención de conflictos socio-ambientales (por ejemplo, problemáticas relacionadas con el agua y los tóxicos ambientales), redes complejas y tecnologías inteligentes. Así mismo, se participa en un proyecto internacional con cinco países, financiado por una Iniciativa Marie Curie de la Comunidad Europea, para el estudio de métodos y tecnologías

relevantes en el campo del envejecimiento. Todos estos problemas implican retos científicos básicos y también aplicados a distintos niveles de organización y en donde la frontera entre las distintas ciencias se vuelve tenue y la interacción entre factores que dan lugar a lo complejo adquiere un papel primordial.

A diferencia de los centros de investigación tradicionales, el C3 no pretende conformar una plantilla permanente sino basar en forma preponderante sus actividades en la labor de investigadores de diferentes entidades académicas de investigación, buscando así mantener la flexibilidad y promover una gran capacidad de adaptación. En su papel generador de nuevos científicos entrenados dentro de esta filosofía, planea contar con un número significativo de puestos posdoctorales y con la posibilidad de invitar por períodos relativamente largos a investigadores visitantes del país y del extranjero. El C3 buscará también establecer nuevos mecanismos para garantizar su dinamismo, de modo que un amplio grupo de científicos de muy diversas áreas puedan confluir en él con objetivos y proyectos comunes. El Centro buscará convertirse en un espacio de encuentro, proporcionando acceso a herramientas y plataformas tecnológicas para llevar a cabo análisis formales, computacionales y de

simulación de escenarios cuantitativos, de visualización y de sistemas de información geográfica. Esta plataforma deberá poder ser utilizada por otros investigadores de la UNAM, participen o no de manera activa en los proyectos impulsados desde el C3.

En síntesis, el C3 plantea tender puentes entre las ciencias exactas, las naturales, sociales y humanísticas; entre teoría, experimento y simulaciones en computadora; así como entre la investigación básica y la aplicada, con el fin de impulsar al desarrollo de prototipos, métodos y tecnologías en muy diversos campos.

En 2013 se inició el proyecto de construcción de las instalaciones para el C3, para lo cual se abrió un concurso entre diversos arquitectos. El edificio estará ubicado en las inmediaciones del Museo Universum en la zona cultural de la UNAM, en un espacio privilegiado y favorecido por su localización y excelentes comunicaciones desde el interior y exterior de la UNAM.

Dados sus objetivos, el diseño del C3 es crucial para lograr impulsar la comunicación, la interacción y el trabajo en grupo. Parte importante de la filosofía detrás de esta iniciativa es la de promover la austeridad y la sustentabilidad, así como la de aprovechar al máximo la infraestructura y equipo disponibles en los otros centros e institutos de la UNAM y de otras instituciones de México, y sobre todo, la capacidad técnica y académica instalada en la UNAM, en otras instituciones de investigación del País, y también del extranjero.

Confiamos en que el C3 se convertirá en un sitio de gran importancia dentro de la UNAM y en el País, donde confluyan las diversas disciplinas y ciencias. Buscaremos optimizar los mecanismos para lograr realizar esta interacción. A pesar de su juventud, los logros del Centro de Ciencias de la Complejidad empiezan a hacerse patentes. Cada vez un mayor número de investigadores y estudiantes se integran a él y la red de colaboraciones se encuentra en pleno crecimiento. El espacio está abierto a la participación de todos.

La interdisciplinariedad se propone erigirse en una especie de Piedra de Roseta capaz de hacer comprensibles las múltiples voces que se oyen en la investigación, mismas que han hecho que el término "babelización" ya se use en varios idiomas.

La visión del C3 es que emerja en los próximos años un espacio de investigación que contribuya al desarrollo de una ciencia y tecnología vigorosas y comprometidas con la sustentabilidad y la justicia social. ■

Referencias

- Anderson, P.W. «More is different.» *Science* 177 (1972): 393-396.
- Bateson, Gregory. «Cybernetics and the Social/Behavioral Sciences.» *Cybernetics & Human Knowing* 3, 1 (1995): 27-45.

- Colander, D. *The Complexity vision and the teaching of economics*. Cheltenham Northampton: Edward Elgar, 2000.
- Espinosa-Soto, Carlos, Pablo Padilla-Longoria y Elena R. Alvarez-Buylla. «A gene regulatory network model for cell-fate determination during *Arabidopsis thaliana* flower development that is robust and recovers experimental gene expression profiles.» *Plant Cell* 16 (2004): 2923-2939.
- Ferguson, Adam. «An essay on the history of civil society.» En *Section II* 205. London: A. Millar and T. Cadell; A. Kincaid and J. Bell, 1767.
- Hayek, Friedrich von. «The Results of Human Action but Not of Human Design, in *New Studies in Philosophy, Politics, Economics*.» 96-105. Chicago: University of Chicago Press, 1978.
- . *The Sensory Order: An Inquiry into the Foundations of Theoretical Psychology*. Chicago: The University of Chicago Press, 1952.
- Kauffman, Stuart. *At Home in the Universe: The Search for Laws of Self-Organization and Complexity*. New York: Oxford University Press, 1995.
- . *Origins of Order: Self-Organization and Selection in Evolution*. New York: Oxford University Press, Technical monograph, 1993.
- McCarthy, Nicola. «Epigenetics: The long view.» *Nature Reviews Cancer* 13, 76 (February 2013).
- Prigogine, I. *The End of Certainty*. New York: The Free Press, 1997.