

Sistemas complejos y patrones emergentes

Mildred Quintana Ruiz

Como organismos inteligentes que somos, es natural para los humanos tratar de explicar el mundo que nos rodea. Muchos científicos, en todos los campos de la ciencia, han contribuido a entender fenómenos como la luz, la electricidad, el magnetismo, la estructura atómica, el ensamblaje de las proteínas, el cerebro humano, etcétera. Mediante este proceso la ciencia ha llegado a un punto donde existe una gran variedad de teorías que cubren la mayoría de las observaciones realizadas, lo que hace posible el desarrollo de la tecnología.

Sin embargo, ¿qué tanto entendemos estas teorías?

Los científicos e investigadores han dedicado gran parte de su tiempo a “partir el todo en las partes”, tratando de describir fenómenos macroscópicos desde sus primeros principios. No obstante, también han existido investigadores para los cuales la meta última es acoplar todas estas teorías y entender de forma unificada la maravillosa variedad de eventos que existen en la naturaleza. Una gran diversidad de avances del pasado fueron dirigidos por el mismo objetivo: en el siglo XVII, Isaac Newton unificó la mecánica celeste con la terrestre; James C. Maxwell, en el XIX, unificó la electricidad con el magnetismo, y Albert Einstein dedicó, sin mucho éxito, los últimos años de su vida a buscar la “teoría de campo unificada”, la cual uniría las teorías de la relatividad general,

la geometría del espacio-tiempo, la gravitación y el electromagnetismo de Maxwell.

Aún en la actualidad existen investigadores tratando de encontrar por diversos caminos esta gran teoría. Algunos ejemplos: el modelo estándar de partículas físicas de Steven Weinberg y colaboradores; la teoría de supercuerdas, desarrollada por investigadores como Michael J. Duff, y recientemente la “teoría final” de Mark McCutcheon, todas ellas sin éxito aparente.

Sin embargo, el reducir el todo a unas cuantas leyes fundamentales no implica la capacidad de comenzar desde estas leyes y reconstruir el universo. Por esto, en las últimas décadas se ha tratado de dar un enfoque distinto a este problema prestando especial atención al término “emergente”, el cual trata de describir el proceso de formación de un sistema complejo a partir de algunas reglas sencillas. Una de las premisas importantes en los procesos emergentes es que la naturaleza no está regulada sólo por reglas microscópicas, sino también por poderosos principios generales de organización que dependen de los individuos y del ambiente en el que éstos se encuentran inmersos.

Sistemas complejos emergentes

Un gran número de sistemas adquieren complejidad de forma espontánea al crecer en número de componentes o en interconexiones entre ellos: la complejidad “emerge” en cuanto se alcanza una cantidad crítica. Por este motivo, estos fenómenos se pueden describir como complejos y emergentes. Algunos

ejemplos son el crecimiento de las ciudades, las migraciones de algunas especies animales, la organización de colonias de insectos, la red mundial (www, por sus siglas en inglés, *world wide web*), los buscadores como Yahoo, Altavista y Google, fenómenos de superficie como la percolación y la adsorción; fenómenos físicos como la magnetización y la superfluidez; fenómenos químicos como el crecimiento de cristales, la naturaleza del enlace químico y la química supramolecular; procesos biológicos como el plegamiento de proteínas, la organización celular, las interacciones necesarias entre las neuronas del cerebro capaces de realizar una acción como el movimiento de un músculo o la resolución de un problema, y sistemas dinámicos como la evolución del cerebro humano en cientos de miles de generaciones.

Los ejemplos anteriores son llamados *sistemas complejos emergentes* por compartir la propiedad de estar formados de un gran número de entidades simples que operan dentro de su ambiente, dando lugar a un colectivo que presenta un comportamiento complicado. Es decir, sus propiedades emergen del incremento en las

interacciones de los individuos, y este comportamiento colectivo representa un nivel superior en la evolución del sistema, ya que no es propiedad de una unidad aislada ni se puede predecir a partir de los individuos de los que se encuentra formado. Uno de los ejemplos más claros dentro de esta perspectiva es la inteligencia, que emerge de las conectividades entre las neuronas sin importar que las neuronas individuales no piensen.

¿Qué propicia el surgimiento de patrones emergentes?

Parte de la respuesta a esta interrogante radica en que el número de interacciones entre los componentes de un sistema se incrementa combinatoriamente con el número de elementos de los que está constituido, es decir, se potencia el surgimiento de muchos nuevos estados. Por ejemplo, las posibles interacciones entre grupos de moléculas crecen enormemente con el número de moléculas involucradas, tanto que es imposible para una computadora enumerar el

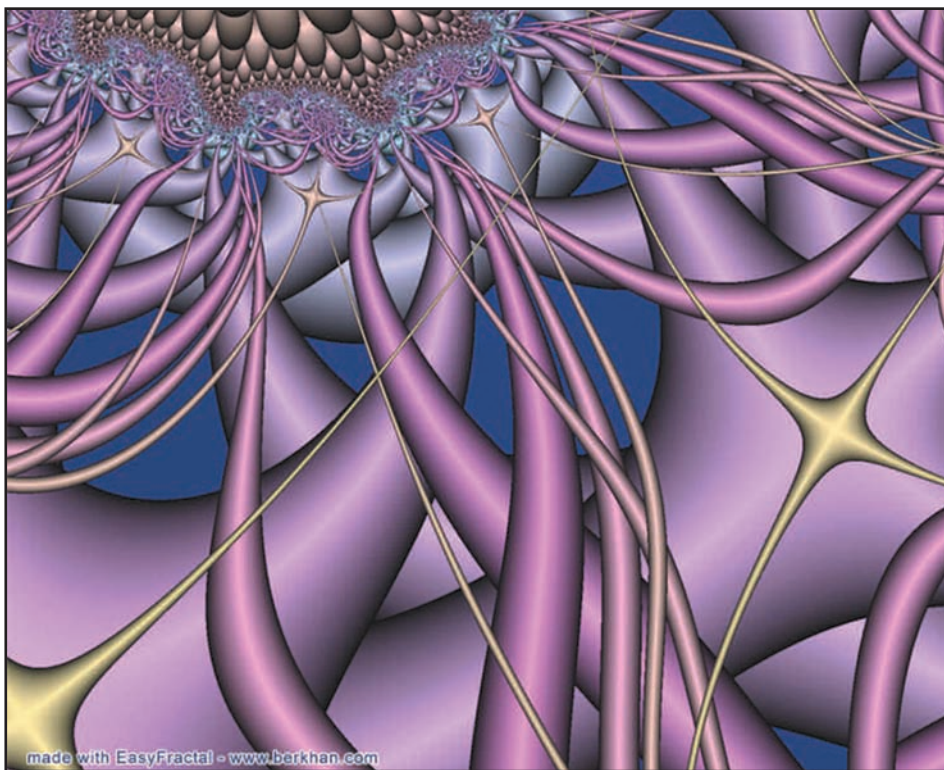
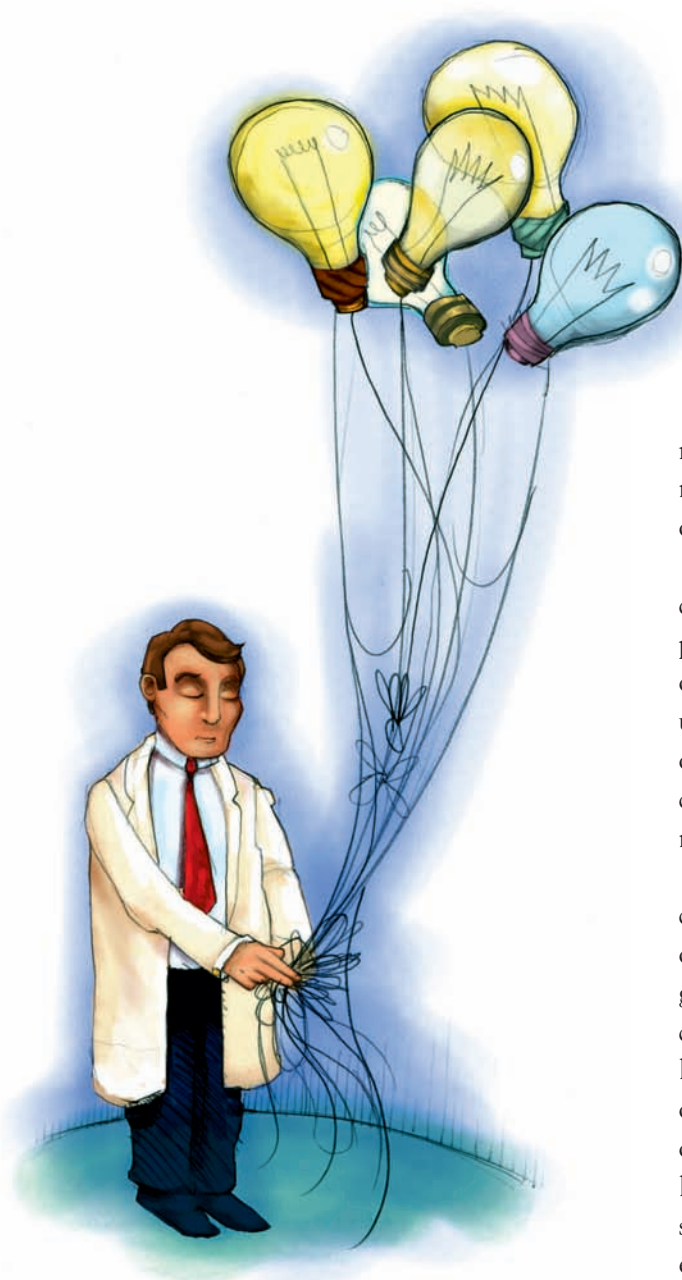


Figura 1. Sinapsis. ¿Cuántas conexiones entre neuronas son necesarias para pensar?

gran número de arreglos posibles para un sistema tan pequeño como 100 moléculas.

Por otro lado, tener un gran número de interacciones no garantiza un comportamiento emergente; muchas de estas interacciones pueden ser irrelevantes, o pueden cancelarse unas con otras. En algunos casos un gran número de interacciones puede ser el factor que evite la formación de un comportamiento emergente



por crear mucho “ruido” y es necesario que el patrón emergente se encuentre temporalmente aislado de otras interacciones hasta que alcance una cierta magnitud crítica que lo autorregule.

Niveles de estructura en organismos primitivos

Un ejemplo muy interesante es el descrito por Nakagaki (2000), donde se plantea el “adiestramiento” de la amiba *Dictyostelium discoideum*, conocida comúnmente como moho del cieno. Este proceso consiste en que el organismo aprenda a optimizar la obtención de recursos localizando la ruta más corta dentro de un laberinto. Estos pequeños organismos tienen la capacidad de permanecer gran parte de su vida como miles de células aisladas que se mueven en forma independiente una de otra. Sin embargo, bajo ciertas condiciones como la falta de alimento, estas células se aglomeran para formar un gran organismo que aparentemente, sin ningún recurso cognitivo o inteligencia central y directriz, puede resolver problemas.

Nakagaki coloca los organismos unicelulares, que formaran después una colonia, dentro de un pequeño laberinto con cuatro posibles rutas y con comida en dos de las cuatro salidas. A pesar de ser un organismo tan primitivo, carente de inteligencia central, el moho del cieno se organiza de tal forma que encuentra la ruta más eficiente para obtener alimento.

En sistemas como éste se tienen que alcanzar diferentes umbrales de diversidad, organización y conectividad antes de que el comportamiento emergente aparezca. Por ello no sólo es el gran número de interacciones entre los componentes del sistema lo que origina el “surgimiento” de algún patrón complejo; también es necesario que estas interacciones estén organizadas. Esto significa que no todos los sistemas complejos que se auto-organizan presentarán alguna propiedad crítica o algún patrón emergente.

Entonces, los sistemas con propiedades o las estructuras emergentes pueden crear o incrementar

su orden a pesar de la pérdida o la carencia de control central, ya que los sistemas abiertos son capaces de extraer información y orden del medio ambiente.

Colonias de hormigas

Otro ejemplo de estas cantidades críticas es el realizado por Pasteels (1989), quien estudiaba fluctuaciones en sistemas fuera del equilibrio. Trabajó con grupos de hormigas; alguno de sus experimentos usaba un recipiente dividido en tres partes, comunicadas por pequeños orificios. En la parte central del recipiente colocaba un número determinado de hormigas, y en las habitaciones laterales cierta cantidad de alimento. Dependiendo del número de individuos, y no de la cantidad de alimento o la distancia hasta él, las hormigas toman diferentes caminos. Cuando el número de hormigas es pequeño tienden a ir todas a la misma fuente de alimento; llegando a un número crítico de hormigas, la mitad se dirige a un lado del recipiente y la otra mitad al otro, y cuando el número de individuos es muy grande, nuevamente tienden a dirigirse casi todas hacia el mismo lugar. Esto nos habla de organización y retroalimentación, lo que en mecánica

estadística fuera del equilibrio se conoce como “teoría de bifurcaciones”.

Los sistemas complejos emergentes son patrones que se forman a partir de varios eventos o reglas. En estos sistemas aparentemente no hay nada que los dirija a formar un patrón determinado, pero las interacciones de cada individuo con su entorno inmediato provocan un proceso complejo que lleva al sistema hacia el orden. Las estructuras que resultan de estas interacciones son mucho más que la suma de sus partes, ya que el orden no surge si varios individuos simplemente coexisten: la interacción entre estas partes es de gran importancia. La organización adquiere significado y vida por sí sola, y comienza a trascender las partes de las que se encuentra formada. Por ello, los sistemas emergentes funcionan “de abajo hacia arriba”, ganando capacidad de adaptación y orden.

En las colonias de hormigas, la reina no da instrucciones directas ni les dice a las demás hormigas qué hacer. Cada individuo reacciona a estímulos químicos enviados por otras hormigas y a la presencia de insectos, comida, desperdicios, etcétera. Y a su vez, deja una señal química que sirve de guía a las demás. Cada unidad reacciona dependiendo únicamente de



su medio ambiente y de reglas genéticas específicas para su especie.

Aun sin la existencia de una dirección centralizada, estas colonias presentan un comportamiento complejo y tienen la habilidad de resolver diferentes problemas geométricos y de cantidades críticas para solucionar dificultades, como encontrar alimento, no estar cerca de otros hormigueros, e inclusive depositar los cuerpos muertos lo más lejos posible de todas las entradas del hormiguero. Las hormigas construyen su cementerio justo en el punto que se encuentra más alejado a la colonia; de la misma forma, los desperdicios se encuentran exactamente en el punto que maximiza la distancia no sólo de la colonia, sino también del cementerio, como si la regla general fuera “colocar las hormigas muertas tan lejos como sea posible, al igual que los desperdicios, pero sin ponerlos uno cerca del otro”. Estas colonias resuelven un problema matemático espacial, encontrando una respuesta perfectamente funcional dentro de su medio ambiente.

Ejemplos como éste han mostrado que las hormigas son buenos símiles de los seres humanos, y se las utiliza para estudiar situaciones de pánico como las que se viven en incendios, temblores o accidentes aéreos. Se ha descubierto que su comportamiento presenta semejanzas con algunas conductas humanas, como el pánico generalizado, en el que aunque los individuos conozcan las instrucciones que pueden salvar sus vidas, no

son capaces de ponerlas en práctica y tan sólo siguen el comportamiento generalizado del grupo.

Sistemas emergentes en física

Los fenómenos emergentes no sólo existen en biología. Para Robert B. Laughlin, premio Nobel de Física (1998), “todas las leyes físicas que conocemos tienen orígenes colectivos”. Para él, el todo no sólo se convierte en algo más, sino también en algo muy diferente de la suma de sus partes.

Algunos ejemplos de fenómenos emergentes en física son eventos tan comunes como el color y la fricción. Las partículas elementales, como protones y electrones, no presentan estas propiedades, ya que las fuerzas entre estas partículas son conservativas. Es necesario que estas partículas interactúen con otras de su tipo para que estas propiedades emerjan. La fricción y el color emergen cuando estudiamos estructuras más complejas cuyas superficies pueden absorber o liberar energía. Otros ejemplos similares son la viscosidad, la elasticidad, la magnetización y la superfluidez.

Transiciones de fase

Un fenómeno especialmente interesante dentro de la física son las transiciones de fase, es decir, los cambios termodinámicos de un estado a otro dis-



tinto. Las fases son casos bien estudiados de fenómenos emergentes, en los que las reglas microscópicas son perfectamente ciertas, pero completamente irrelevantes para describir el fenómeno macroscópico.

Experimentalmente, las transiciones de fase se observan como un cambio abrupto en las propiedades de las sustancias, en particular en la capacidad calorífica con relación a la temperatura como variable termodinámica. No se han descubierto hasta ahora todos los posibles estados o fases de la materia, y éstas no se pueden deducir *ab initio* (a partir de las propiedades elementales).

Se sabe que cúmulos pequeños de moléculas no presentan transiciones de fase de primer orden, como son la fusión o la evaporación, ya que en las fronteras no es posible caracterizar al cúmulo como líquido o sólido: estos conceptos sólo son aplicables a sistemas macroscópicos.

Algunos ejemplos de transiciones de fase son:

- La transición entre la fase sólida, líquida y gaseosa (evaporación, condensación, sublimación, licuefacción, congelación, etcétera).
- La transición entre la fase ferromagnética y la paramagnética, en materiales magnéticos, en el punto correspondiente a la temperatura de Curie.
- La emergencia de superconductividad en algunos materiales cuando se enfrían por debajo de su temperatura crítica.

- La condensación cuántica de fluidos bosónicos, como la condensación Bose-Einstein y la transición a superfluido en el helio líquido.
- El rompimiento de la simetría, en procesos como la adsorción superficial y la percolación.

Rompimiento de simetría

El fenómeno conocido como rompimiento espontáneo de simetría es un caso de proceso emergente.

La materia, colectiva y espontáneamente, adquiere una posición preferente, inclusive aunque no haya señal alguna de que sea una mejor posición con respecto a cualquier otra que el sistema pudiera tomar. La materia se organiza aleatoriamente. Por este camino, la naturaleza se vuelve compleja por sí sola, aunque las reglas por las que se rige parezcan muy simples. Tal es el caso de la magnetización, en la que todos los espines de los átomos de metal tienden a alinearse en una dirección preferente, dándole al material características completamente distintas a las de su estado original.

Sistemas complejos emergentes en química: síntesis supramolecular

La química supramolecular fue desarrollada por investigadores como Jean Marie Lehn y Charles J. Pedersen, quienes por su trabajo compartieron el



premio Nobel de Química en 1987. La química supramolecular se enfoca literalmente a ir más allá de la química molecular: estudia sistemas formados por más de una molécula, y trata de entender tales estructuras emergentes, así como su función y su ensamblaje.

Un ensamblaje supramolecular es un sistema de múltiples componentes: átomos, iones y moléculas que se mantienen unidos por enlaces no covalentes, como puentes de hidrógeno, fuerzas de van der Waals, etcétera, lo que les confiere propiedades interesantes. Pueden presentar propiedades magnéticas, luminiscentes, fluorescentes, actividad catalítica o propiedades de óxido-reducción. Estas características los hacen de gran utilidad para el desarrollo de nuevas tecnologías, como el diseño de sensores de alta resolución o dispositivos de almacenamiento de información para computadoras de la nueva generación.

Algunos ejemplos de sistemas supramoleculares son los ácidos nucleicos, las proteínas, las membranas biológicas, los metales complejos, los cristales moleculares y los cristales líquidos. Pero, ¿cómo se forman estos ensamblajes supramoleculares? Hasta ahora el mejor camino para explicarlo ha sido mediante procesos emergentes, es decir, técnicas de autoensamblado, lo que significa mezclar los componentes bajo ciertas condiciones de acidez, temperatura, tipo de disolvente, etcétera, y posteriormente dejarlos evolucionar

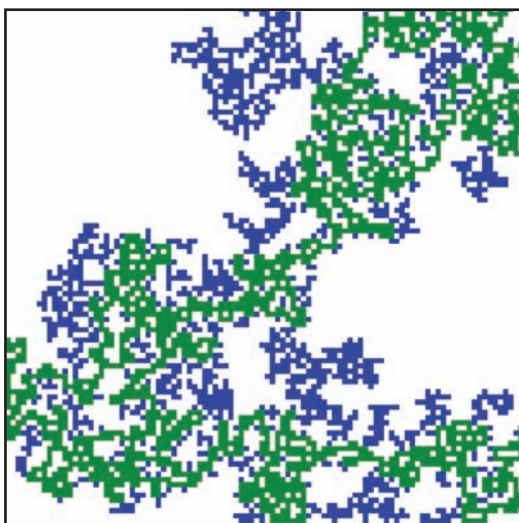


Figura 2. Transición de fase en el proceso de percolación. Se forma el cúmulo que conecta la superficie de lado a lado.

en el tiempo. Este procedimiento da como resultado compuestos inesperados; sin embargo, afortunadamente para los químicos supramoleculares, los procesos de autoensamblado generalmente se dirigen a los mismos arreglos, por ser éstos termodinámicamente más estables. Esto garantiza un método de síntesis de nuevos materiales con propiedades que no dependen exclusivamente de las moléculas o iones de los cuales se encuentran formados, sino también del ambiente en el que se desarrollaron.

Adaptabilidad e inteligencia

Los sistemas complejos emergentes en todos los campos –biológicos, sociales, tecnológicos, físicos o químicos– utilizan reglas locales entre los individuos que interactúan, y crean un comportamiento aceptado por el medio ambiente que los rodea. En los *sistemas adaptativos*, la ignorancia y la aleatoriedad son muy útiles e importantes. Son mucho más adecuados los sistemas formados por elementos simples que se encuentran densamente interconectados y que interactúan aleatoriamente, porque son capaces de encontrar muchas y nuevas posibilidades para ajustarse mejor al ambiente, y por tanto el comportamiento más sofisticado emerge por sí solo.

Sin adaptación, la complejidad emergente es un patrón hermoso, pero sin posibilidad de cambiar, como un cristal de hielo. Para que exista la adaptación es necesario que el sistema aprenda. El cuerpo humano aprende inconscientemente, al igual que lo hacen las ciudades, las colonias de hormigas y el internet. Aprender no es sólo conocer la información: también es almacenarla y saber dónde encontrarla.

La inteligencia tiene que ver con la capacidad de reconocer cambios estructurales y responder a ellos. Es alterar el comportamiento del sistema en respuesta a los cambios en el ambiente para hacerlo más exitoso. Por otro lado, el sistema no necesita ser consciente de su capacidad de aprendizaje, como ocurre con nuestro sistema inmunitario, el cual no es consciente de proteger a nuestro organismo de los diferentes tipos de enfermedades: sólo guarda la información y es capaz de utilizarla cuando tiene que resolver algún problema.

Crecimiento de grandes ciudades

Un ejemplo muy interesante de adaptabilidad e inteligencia es el caso del crecimiento de grandes ciudades como México, Distrito Federal. Esta ciudad, a través de los años, ha sido un nodo muy importante para el comercio y el desarrollo cultural. Sin embargo, su crecimiento ha sido muy violento y sin precedentes. La ciudad creció demasiado rápidamente, haciendo que las autoridades no puedan mantenerla en orden. En realidad ha crecido sin un único gobierno central, sin gente encargada de su planeación, sin policía suficiente y sin los servicios médicos necesarios.

Sin embargo, esta ruidosa, contaminada y sobrepoblada ciudad atrae año con año a una gran cantidad de intelectuales, figuras públicas, industriales y comerciantes. Es en ciudades como ésta donde la civilización trabaja y hace milagros. La sociedad por sí sola se organiza y se crean gradualmente cordones sanitarios que separan las zonas industriales de las habitacionales. La

ciudad se organiza de tal forma que puede ocultar sus propias atrocidades.

Esta mezcla de orden y desorden es producida por los procesos emergentes. Las grandes ciudades tienen vida propia, con una personalidad coherente que organiza y refleja las decisiones de millones de individuos. Esto crea una organización global constituida por un gran número de interacciones.

Los negocios en la red

Otro ejemplo muy importante de sistemas que aprenden son los buscadores como Google, AltaVista y Yahoo, y el portal de ventas Amazon. Dentro de la red, los documentos existentes constituyen los individuos, y las ligas entre ellos son las interacciones. El tamaño de la red era cercano a un billón de individuos a final de 1999 (Lawrence y Giles). Portales como los mencionados anteriormente son necesarios y



Figura 3. Vista aérea de la ciudad de México. Mezcla de orden y desorden.



A diferencia de los sistemas biológicos, sistemas como la red son grades formadores de conexiones, pero pierden estructura: fueron diseñados para crecer a gran escala, pero son indiferentes a la creación de niveles de organización mayor

existen debido a que la red es un espacio terriblemente desorganizado. Es un sistema donde el desorden crece proporcionalmente con su volumen.

Estos portales están diseñados para estructurar información, lo cual es una paradoja de la red: entre más información fluya dentro de ella, más difícil es encontrar información de algún tema en particular. El comercio dentro de esta gran red es un generador de procesos emergentes, por la tendencia a formar grupos de individuos con directrices semejantes. Este tipo de procesos demandan una gran cantidad de exploración en manejo de negocios, lo que ha llevado a las compañías a estudiar fenómenos como la formación de cúmulos y estructuras: grupos en los cuales los consumidores son capaces de sumergirse y encontrar respuestas a sus necesidades específicas. Los diferentes grupos hacen recomendaciones de acuerdo con las necesidades pasadas de sus consumidores, o con las necesidades de miles de personas que tienen gustos afines o necesitan información semejante. Estos cúmulos se crean a partir de nexos, los cuales a su vez son constructores de estructuras que sustentan teorías mentales; y estas teorías forman un grupo de proyectos ensamblados vía la red, contruidos de un gran número de ideas aisladas.

Cada teoría dentro de cada cúmulo será más especializada que cualquiera de sus partes.

Sin embargo, los sistemas inteligentes dependen de la estructura y organización más que del número de conexiones. A diferencia de los sistemas biológicos, sistemas como la red son grades formadores de conexiones, pero pierden estructura: fueron diseñados para crecer a gran escala, pero son indiferentes a la creación de niveles de organización mayor.

El fin del reduccionismo

Actualmente encontramos en todas las disciplinas transiciones del desorden al orden; los anteriores son sólo algunos ejemplos de sistemas emergentes. Ejemplos de cómo la naturaleza se *auto-organiza* para mostrar comportamientos complejos a partir de algunas reglas sencillas. Para algunos autores, como R. B. Laughlin, premio Nobel de Física en 1998, vivimos una época en la que la tendencia reduccionista ha terminado: un tiempo en el que el modo de explicar la naturaleza a partir de sus principios microscópicos ha sido sustituido por el método de tratar de entender eventos macroscópicos a partir de todas sus causas y con todas



sus consecuencias. Esto no significa que las leyes microscópicas estén mal o no tengan razón de ser; sólo que son irrelevantes en muchas circunstancias, como lo son para las leyes organizacionales de niveles superiores en el universo, es decir el mundo macroscópico. Nos encontramos tan sólo al principio en la profundización de nuestros conocimientos sobre la naturaleza.

Agradecimientos

Especialmente a Andrés Hernández Arana, de la Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa (UAM-I), por compartir conmigo el gusto por la lectura y la discusión. A Antonio Campero, a Isaac Kornhauser (UAM-I) y a Miguel Ángel Carranza por sus valiosos comentarios.

Mildred Quintana Ruiz estudió la licenciatura en Química en la Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, donde ahora estudia el doctorado en Ciencias, en el Departamento de Química, en el área de Físicoquímica de Superficies.
mil@xanum.uam.mx

Para saber más

Johnson, Steve (2001), *Emergence: the connected lives of ants, brains, cities, and software*, Nueva York, Touchstone.
Laughlin, Robert B. (2005), *A different universe (reinventing physics from the bottom down)*, Nueva York, Basic Books.

Bibliografía

Nakagaki, T., "When slime is not so thick", *BBC News*, agosto 27, 2000.
Pasteels, J. M., D. Daloze y J. L. Boeve (1989), "Aldehydic contact poisons and alarm pheromone of the ant *Crematogaster scutellaris* (Hymenoptera: Myrmicinae). Enzyme-mediated production from acetate precursors", *Journal of chemical ecology*, 15:1501-1511.
Lehn, M. J. (1988), "Supramolecular chemistry - scope and perspectives molecules, supermolecules, and molecular devices" (conferencia Nobel), *Angewandte chemie international edition in english*, 27, 1, 89-112.
Réka, Albert y Albert-László Barabási (2002), "Statistical mechanics of complex networks", *Reviews of modern physics*, 74, 47-97.
Stanley, Eugene (1999), "Scaling, universality, and renormalization: three pillars of modern critical phenomena", *Reviews of modern physics*, 71, S358-S366.

