

BIOLOGÍA DE SISTEMAS, FÍSICA Y FENÓMENOS COLECTIVOS

Octavio Miramontes¹ y Bartolomé Luque²

¹Depto. de Sistemas Complejos, Instituto de Física, UNAM. Circuito de la Investigación Científica, Ciudad Universitaria, Coyoacán, C.P. 04510, México, D.F. ²Depto. de Matemáticas, ETSI-A, Universidad Politécnica de Madrid, España. E-mail: 1octavio@fisica.unam.mx

Es casi imposible imaginar hoy en día una descripción de la estructura y funcionamiento de los seres vivos sin recurrir a la idea de sistemas mutuamente dependientes y en interacción. ¿Pero lo ha sido así siempre? La biología es una ciencia relativamente joven y mucho de su legitimidad científica fue heredada de la física descartiana, donde imperaba la idea de que la naturaleza podía descomponerse en pequeñas unidades más pequeñas para su estudio detallado, de tal manera que el estudio del todo sería la suma de las partes estudiadas por separado. Esta visión, lamentablemente, aún subsiste hasta nuestros días bajo el nombre de “reduccionismo científico”.

A lo largo de la historia de la biología, ha sido posible observar momentos en los que el reduccionismo como filosofía cobra un gran auge y momentos en los que esta concepción se debilita. Existen varios temas en la biología donde esta dicotomía entre el reduccionismo y el holismo (que considera que la suma de las partes da lugar a “algo más” que la simple suma), se ha expresado de manera clara. Uno de los ámbitos donde esto ocurre es en el tema de la biología de fenómenos sociales, y no es para menos, ya el mismo Charles Darwin había dejado de lado el estudio de fenómenos sociales como el de la existencia de colonias de hormigas por ser ejemplos que escapaban a sus incipientes explicaciones evolutivas¹. Ya entrado el siglo XX, surgieron los primeros intentos de explicar la evolución de sociedades desde lo que se dio por llamar «darwinismo social»; pero ninguna explicación era definitiva ni sólida. Paralelamente, cobró fuerza el concepto de «superorganismo», donde se explicaba que en realidad las hormigas (también abejas o cualquier otro insecto social) eran un equivalente a una célula y la colonia era un organismo^{2,3}. Se daba de esta manera, reconocimiento implícito a que la estructura global, macroscópica y colectiva, era un ente vivo con propiedades que eran «algo más» que la suma de sus participantes individuales. Uno de los grandes exponentes de esta visión, y desde luego no el único, es el conocido entomólogo

francés Remy Chauvin⁴ o el afamado divulgador Douglas Hostadter⁵.

Detrás de la idea «holística» del superorganismo está la idea de la «emergencia» según nos la explica la moderna ciencia de la física de los sistemas complejos, es decir, el «algo más» que caracteriza macroscópicamente a los sistemas biológicos, son las propiedades emergentes que surgen de las interacciones locales entre componentes individuales, sean células u organismos. Entonces, las sociedades y el fenómeno social, son las propiedades emergentes de las interacciones de los individuos. Para algunos, la emergencia de sociedades es, inclusive, una propiedad inevitable en la evolución de la materia viva, pues al haberse manifestado varias veces por separado en la evolución biológica «constituye un verdadero atractor biológico», según lo explica el sociobiólogo Edward Wilson⁶.

La noción de emergencia en fenómenos sociales ha dado pie a una de las ramas de mayor crecimiento en nuestros días^{7,8}: la física de fenómenos sociales o fenómenos colectivos. Las sociedades humanas no escapan a este renovado interés y como lo dijo en alguna ocasión el sociólogo estadounidense George Lundberg⁹ en 1939, «los próximos desarrollos en las ciencias sociales vendrán no de los científicos sociales, sino de otra gente entrenada en otros campos». Así las cosas, y una vez comprobada la increíble capacidad de predicción de Lundberg, algunos autores recientemente llaman a este nuevo campo «física social» o «sociofísica», pues «esos campos» resultaron ser el de los físicos estadísticos. Veamos algunos ejemplos.

FÍSICA Y FUTBOL

Brasil juega la final de la copa del mundo contra Alemania, en un partido desbordante de emoción. De pronto, en algún lugar de las tribunas, un reducido grupo de aficionados se levanta simultáneamente y con las manos arriba grita: ¡ooooooooo! La actitud fiestera contagia inmediatamente a las personas que se encuentran cerca y así sucesivamente. Poco a poco, en cuestión de segundos, la tribuna cobra vida propia y vista desde lejos, el movimiento de esos aficionados parece una ola que avanza

dando vueltas al estadio. Nadie lo planeó así, nadie dio la orden para que ese grupo inicial se levantara y, mucho menos, para que el estadio entero imitara esta actitud. Cuando llega el silbatazo final y el marcador de 2-0 ya anuncia la victoria de Brasil, ese movimiento colectivo es repetido una y otra vez, un fenómeno que antes, desde la copa de México en 1968, había dado la vuelta a los estadios del mundo: la famosa *ola mexicana*.

Este fenómeno colectivo ciertamente podría ser un caso de estudio para psicólogos sociales que estuvieran interesados en estudiar el perfil de los aficionados y su predisposición a identificarse e imitarse mutuamente, basados en patrones culturales propios. Curiosamente es un comportamiento que también atrae la atención de los físicos interesados en explicar cómo este fenómeno surge exactamente después de la sincronización inicial de un grupo muy pequeño de individuos. En un estudio al respecto¹⁰, físicos de la Universidad de Budapest desarrollaron un modelo matemático generalizado que describe y predice el principio físico que regula este fenómeno, sin tomar en cuenta si los felices aficionados son brasileños, españoles o mexicanos; o si el juego se desarrolla en Corea, Moscú o Madrid.

Los fenómenos sociales son, hoy en día, un tema de gran interés para la física de los sistemas complejos. Pero debe advertirse que este nuevo interés no se limita al estudio de fenómenos sociales donde intervienen humanos, también son de interés las sociedades compuestas por otros organismos como insectos o primates y, aún más, las sociedades artificiales compuestas por robots y máquinas y también por criaturas digitales que viven en el ciberespacio y ¿por qué no? las posibles sociedades extraterrestres (si éstas se llegaran a encontrar algún día). Pero, ¿es esto posible? La física de los sistemas complejos interpreta el fenómeno social como una propiedad emergente de un grupo de individuos que interactúan entre sí, sin importar los detalles materiales de los individuos. Es por esto que el estudio de dichos fenómenos colectivos acaba siendo un estudio de la complejidad, un estudio profundamente interdisciplinario.

Una de las grandes contribuciones de la ciencia de los sistemas complejos al entendimiento de los fenómenos sociales consiste en el desarrollo de modelos computacionales conocidos como *modelos basados en agentes*. Estos modelos consisten en un conjunto de partículas -los agentes-, que tienen reglas de conducta y que pueden interactuar bajo ciertas reglas, para modificar esas conductas. Este principio simple es la base de todo fenómeno social. Este principio de interacción-modificación puede originar fenómenos nuevos en escalas diferentes a la local, que emergen espontáneamente en escalas de tiempo y espacio mayores, exactamente como sucede con la ola mexicana. Los modelos de agente han sido extremadamente útiles para el estudio de procesos sociales de muchos tipos, como el crecimiento urbano, las tendencias electorales, los mercados financieros, la emergencia de la cooperación, el comportamiento de masas, etcétera^{11,13}.

Luego de que se reconoció que estos modelos computacionales describían de manera correcta la fenomenología social que se pretendía estudiar, se hizo evidente que las interacciones entre los individuos podían generalizarse como si éstas ocurrieran en redes, donde los individuos eran los nodos y las interacciones los enlaces. Esta visión resultó extremadamente exitosa para estudiar una gran diversidad de conductas colectivas, dando lugar a las llamadas redes complejas^{14,15}.

REDES SOCIALES COMPLEJAS

Hace unos años se puso de moda en Estados Unidos un entretenimiento llamado el juego de Bacon que tenía como protagonista central al actor Kevin Bacon. Un participante pensaba el nombre de un actor o actriz cinematográfico. Si dicho sujeto había compartido reparto con Bacon en alguna película, su número de Bacon era 1. Si nunca había participado con Bacon en el mismo film, pero lo había hecho con alguien que sí, se le asignaba número de Bacon 2. Y así sucesivamente. El juego consistía en establecer la cadena más corta, el número de Bacon más bajo posible para el personaje cinematográfico propuesto. En el departamento de Ciencias de la Computación de la Universidad de Virginia, llevaron la idea del juego hasta su extremo. Gracias a la base de datos de actores más grande del mundo, Internet Movie Database (<http://www.imdb.com/>), compuesta por más de medio millón de nombres y unas 275.000 películas, el Oráculo de Virginia (<http://www.cs.virginia.edu/oracle/>) es capaz de determinar instantáneamente el número de Bacon de cualquier actor o actriz. Por ejemplo, introducimos María Rojo y la respuesta del Oráculo es: «María Rojo actuó en *Un mundo maravilloso* (2006) con Cecilia Suárez, que actuó en *The air I breathe* (2007) con Kevin Bacon. De modo que el número de Bacon de María Rojo es 2.

Encontrar algún actor o actriz con un número de Bacon mayor que tres es extremadamente difícil. De hecho nadie posee un número de Bacon superior a once. Para medir el número medio de pasos que separan a un actor escogido al azar, se calcula el número de personas que se encuentra a un paso (1,469 actores), a dos pasos (105,800 actores), etcétera y se estima el promedio. Para Bacon es de tan sólo 2.9. ¿Significa esto que Kevin Bacon es el centro del universo cinematográfico? Podemos tomar como protagonista del juego a cualquier otro personaje. Por ejemplo, Sean Connery. El famoso actor irlandés posee un número medio de intermediarios de 2.66, inferior al de Bacon. Después de procesar la base de datos, los científicos han descubierto que existen actualmente 912 actores que son mejores centros que Bacon. En realidad estamos hablando de una tupida red donde los nudos son actores conectados entre sí mediante enlaces que indican que trabajaron juntos. A pesar de que estamos hablando de una red formada por medio millón de personas, unidos profesionalmente pero repartidos por todo el planeta, la «distancia media» entre cualquiera de ellos es de tan sólo 3.65 pasos. Es decir, en esa red, para pasar de un nudo a otro a través de hilos, sólo tenemos que dar un promedio de unos cuatro saltos. ¿Es ello

debido a las características particulares del séptimo arte? La respuesta es negativa.

Mucha gente ha experimentado sorpresa, después de conversar con un desconocido con quien compartía asiento en un largo viaje, al comprobar que tenían conocidos comunes. «El mundo es un pañuelo», asentimos. En los años 60, el psicólogo social S. Milgram, concluyó un experimento pionero en redes sociales que intentaba concretar el tamaño de ese pañuelo. Milgram seleccionó arbitrariamente individuos en Nebraska. Se les pedía entonces que enviaran una carta a través de una cadena de conocidos mutuos hasta un individuo desconocido para ellos en Boston, a unos 2.500 km. Cada uno de los iniciadores de la cadena enviaba entonces a un conocido la carta con idénticas instrucciones. Siempre con la suposición razonable de que la distancia al personaje objetivo disminuiría. Se trataba de un esquema semejante al juego de Bacon.

Ahora, en vez de actores tenemos ciudadanos corrientes y dos ciudadanos están conectados entre sí, no porque hayan actuado juntos en una misma película, sino simplemente porque se conocen. En 64 casos se lograron establecer cadenas de conocidos que llevaban la carta desde el individuo inicial al individuo diana en Boston. ¿Qué número de individuos, diría el lector, que separaban en promedio a dos personas escogidas al azar de entre la población norteamericana de unos 200 millones de individuos? La respuesta es: ¡tan sólo seis! Desde entonces este resultado se conoce como "seis grados de separación", la versión estadística del dicho popular: el mundo es un pañuelo.

Ciertamente el experimento de S. Milgram ha sido muy criticado por su falta de rigor estadístico y conclusiones que no se siguen de la experiencia. Pero es justo citarlo como intento pionero. Sin embargo, recientemente los físicos han empezado a encontrar el fenómeno de "seis grados de separación", entendido como una distancia media entre nodos sorprendentemente baja para redes gigantescas, en la estructura de las redes más variopintas. Ellos prefieren decir que las redes presentan efecto "Small-World". Las técnicas de análisis han demostrado que no sólo las redes sociales, sino redes como las de energía eléctrica o Internet, y muchas redes biológicas como el sistema nervioso, ecosistemas o metabolismos, poseen propiedades estructurales comunes que exhiben el fenómeno de "Small World".

Cuando empezaron a estudiar la estructura de estas redes, los investigadores esperaban que fuera al azar, lo que llaman redes aleatorias. Es fácil ver que en una red donde los enlaces se han establecido de forma aleatoria, el camino medio entre dos nodos cualesquiera debe ser bajo. Pensemos en una red de relaciones de amistad. Si alguien conoce en promedio a unas 1000 personas, y cada una de ellas conoce a otras mil, en sólo dos pasos alcanzamos una población de un millón de personas... pero como el lector ya habrá intuido, las redes sociales no están formadas al azar. Los amigos de mis amigos suelen ser amigos míos. Como

gusta decir a los científicos, las redes sociales muestran alta clusterización o transitividad. Una red regular, como una malla cuadrada, por ejemplo, exhibe alta transitividad, pero no efecto Small-World. ¿Qué estructura poseen las redes sociales para mantener alta la transitividad y baja la distancia media? Las redes investigadas presentan una distribución de conexiones en forma fractal que se ha denominado libre de escala. En estas redes hay un pequeño porcentaje de nodos, llamados "hubs", que poseen muchísimas conexiones, mientras que la mayoría poseen pocas. Estos "hubs" son los responsables del efecto *Small World* y de la alta transitividad en las redes libres de escala. Los sociólogos ya tenían conciencia de la existencia de "hubs" en las redes sociales desde que empezaron a estudiarlas en los años 30. Esos conectores son personas que conocen a mucha gente, a los que podemos llegar en «pocos pasos» a través de esa red de relaciones y que se manejan en distintas subculturas y estratos sociales. Han sido conscientes desde su descubrimiento de que los conectores pueden ser los iniciadores de una epidemia (en su sentido más amplio: moda, tendencias, ideologías, tecnologías...) cuando una noticia que les parece interesante llega a ellos. Ahora los físicos están desentrañando la estructura matemática de esas redes y su conocimiento abre nuevas posibilidades. Por ejemplo: en un reciente estudio se construyó la red de relaciones sexuales de 2.810 individuos basada en estadísticas realizadas en Suecia. Se analizaba la distribución de parejas a lo largo de un año. Los nudos de esta red eran los sujetos y los hilos estaban presentes entre individuos que habían mantenido relaciones sexuales al menos una vez a lo largo del año de estudio. La red exhibe una estructura libre de escala. Eso tiene una importancia trascendental para el desarrollo de estrategias contra enfermedades por contagio sexual. Los estudios epidemiológicos clásicos predicen que ha de vacunarse en muchos casos hasta un 90% de la población para erradicar una epidemia. Los resultados teóricos recientes, que tienen en cuenta la estructura libre de escala de las redes, muestran como una política de intervención más eficiente consiste en vacunar a los "hubs". Y si esto vulnera la intimidad de las personas, basta con asegurarse de que se vacuna a una persona cualquiera y al resto de sus conocidos. Con esta estrategia tan sencilla se asegura casi al 100% que se está vacunando a un "hub", aunque se desconozca quién es en concreto.

Durante las últimas décadas, para progresar en el estudio de las dinámicas extendidas sobre redes, los físicos habían obviado los problemas asociados a la estructura o topología. De este modo la investigación podía centrarse en la complejidad del comportamiento colectivo producida por el acoplamiento no lineal de los nodos. Así se ha tendido a utilizar redes de geometría regular, cadenas lineales o cuadrículas bidimensionales para acoplar agentes (por ejemplo, pensemos en los fenómenos de sincronización como el de *la ola mexicana*). En otras áreas se ha optado por la conexión total, todos con todos o se han usado estructuras aleatorias, donde las conexiones entre nodos se establecen al azar. En cierto modo, la estructura del conexionado

entre agentes en estos sistemas se estaba obviando. Ahora se ha descubierto que la estructura de las redes puede ser determinante en su funcionamiento. Los fenómenos de percolación como las epidemias, los de sincronización, cooperación y un largo etcétera bien estudiados por los sistemas complejos están mostrando nuevas propiedades al amparo de la estructura de las redes en donde se desarrollan. Causó sorpresa el hecho de encontrar estructuras topológicas semejantes y con estructuras inesperadas en las redes de ámbitos extraordinariamente distintos. Los físicos están intentando justificar teóricamente este hecho. La relación con las reglas de crecimiento y evolución de dichas redes o los principios de optimización son tan sólo algunos de los problemas que están siendo abordados. El objetivo final es allanar el camino para entender el diálogo entre la dinámica y la estructura de esas redes que forman el mundo y en las que en muchos casos estamos inmersos.

El estudio de las redes complejas no se limita, desde luego al estudio de las relaciones sociales entre elementos de un grupo o comunidad. Otro campo donde ha tenido un impacto muy importante es el de la genómica, donde las interacciones entre genes y la fenomenología que eso da lugar, estudian exitosamente cuando los genes se consideran interconectados entre sí, en redes de expresión o regulación¹⁶. Dado que las ciencias genómicas son uno de los pilares de la biología moderna, la biología de sistemas ha encontrado un nuevo aliado fundamental, de hecho, sería un poco difícil pensar que luego de que el concepto de emergencia se ha afianzado y se ha ayudado de la gran contribución de la ciencia de los sistemas complejos, la biología de sistemas, como paradigma, caiga de nuevo en desuso próximamente, para dar paso a su eterno rival: la visión reduccionista en la ciencia. Esta vez creemos que no nos equivocaremos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a DGAPA-PAPIIT INI18306, por la ayuda financiera.

REFERENCIAS

1. Cronin, H. *The Ant and the Peacock: Altruism and Sexual Selection from Darwin to Today*. Cambridge University Press (1993).
2. Richerson, P.J. & Boyd, R. Complex societies. The evolutionary origins of a crude superorganism. *Human Nature-An Interdisciplinary Biosocial Perspective* **10(3)**, 253-289 (1999).
3. Detrain, C. & Deneubourg, J.L. Self-organized structures in a superorganism: do ants behave like molecules? *Physics of Life Reviews* **3(3)**, 162-187 (2006).
4. Chauvin, R. *The world of ants*. Gollancz (1970).
5. Höstader, D., Gödel, Escher, Bach. Basic Books (1979).
6. Wilson, E.O. *The diversity of life*. W. W. Norton & Company; 2nd edition (May 1999).
7. Holland, J.H. *Emergence: from chaos to order*. Oxford Univ Pr (Sd), New edition (2000).
8. Johnson, S. *Emergence: the connected lives of ants, barins, cities and software*. Scribner (2002).
9. Lundberg, G., citado en: Ball, P. *Critical Mass: How One Thing Leads to Another*. Farrar, Straus and Giroux (2004).
10. Farkas, I., Helbing, D. & Vicsek, T. Social behaviour: Mexican waves in an excitable medium. *Nature* **419**, 131-132 (2002).
11. Nédá, Z., Ravasz, E., Brechet, Y., Bishkek, T. & Varabais, A.L. Selforganizing processes: The sound of many hands clapping. *Nature* **403**, 849-850 (2000).
12. Helbing, D., Farkas, I. & Vicsek, T. Simulating dynamical features of escape panic. *Nature* **407**, 487-490 (2000).
13. Whitefield, J. Ants shape Europe's biggest carnival. *Nature* 22 August 2002.
14. Strogatz, S.H. Exploring complex networks. *Nature* **410**, 268-276 (2001).
15. Newman, M.E.J. The structure and function of complex networks. *SIAM Review* **45**, 167-256 (2003).
16. Espinosa-Soto, C., Padilla-Longoria, P., & Alvarez-Buylla E.R. A gene regulatory network model for cell-fate determination during *Arabidopsis thaliana* flower development that is robust and recovers experimental gene expression profiles. *The Plant Cell* **16(11)**: 2923-2939 (2004).