

Un método para explorar lo complejo

Joaquín Marro*

Instituto Carlos I de Física Teórica y Computacional

Universidad de Granada, 18071 – Granada

Nuevos conceptos y estrategias nacidos en física y matemáticas durante las últimas décadas están hoy percolando todas las ciencias, propiciando así su desarrollo cuantitativo y ayudando a comprender en profundidad, no sólo la naturaleza en que vivimos, sino las estructuras sociales que venimos formando. Este ensayo, que resume lo esencial en charlas impartidas por el autor en las jornadas “Pensamiento Complejo y Ciencias de la Complejidad: Aplicaciones en Ciencias Sociales y Humanidades” (Universidad Internacional de Andalucía, Baeza 15–17 Diciembre 2011), refiere esa realidad y muestra cómo afrontar de este modo algunos enigmas del conocimiento actual. Por su valor demostrativo, describimos escenarios relacionados con las extinciones bruscas de las especies, los embotellamientos de tráfico, los aspectos gregarios del comportamiento humano, y la inteligencia. Se concluye acerca de la existencia de una incipiente estructura formal que podría llevar a una nueva ciencia interdisciplinar capaz de englobar mucha fenomenología que actualmente pertenece a disciplinas como biología de sistemas y sociología cuantitativa. La descripción en este ensayo, que también ilustra cómo ha de desterrarse la idea de que la física es abstracta y remota, se completa en Marro (2008) donde, en particular, se hace un retrato acorde de la teoría del caos.

Universo estructurado

La física, la filosofía y otras disciplinas han puesto de manifiesto que la naturaleza puede verse como suma de objetos diversos —desde cúmulos de galaxias hasta ecosistemas, seres vivos o moléculas— cada uno con muchas partes parecidas entre sí en íntima relación (Mainzer 2004, Marro 2008). Las galaxias del universo

* jmarro@ugr.es

pueden llegar a colisionar violentamente; la gravedad interestelar genera en cada galaxia corrientes de estrellas, y éstas no son a la postre sino un conglomerado de electrones, neutrinos y quarks ordenados al dictado de sus interacciones. ¡Y esto se repite en muchos niveles y contextos! Relaciones de amistad o sociales y contactos profesionales o de negocios configuran nuestras comunidades y economías. La evolución biológica es consecuencia de las interacciones entre genes. Las relaciones tróficas —quién se come a quién— determinan los ecosistemas. La célula funciona gracias a un completo conjunto de reacciones metabólicas interdependientes... La cooperación entre los constituyentes de un objeto es tan decisiva para configurar su forma y funciones que los mismos elementos que provocan la emisión de radiación en la estrella son capaces de generar inteligencia y emociones en el cerebro.

Esto sugiere preguntarnos: ¿Es posible concluir sobre comportamientos sociales, desastres naturales, origen de la vida y otras incógnitas que nos preocupan sin más que saber cómo cooperan los elementos del objeto en cada caso? O, exigiéndonos mayor profundidad en la pregunta: ¿Existe un principio único que determina cómo han de organizarse los elementos en cada uno de los objetos que conforman el universo? La investigación científica, que cada vez plantea objetivos más interdisciplinarios, nos ha enseñado recientemente cómo conceptos y métodos surgidos en física hace más de un siglo para comprender propiedades de la materia —que hoy sabemos consecuencia de la cooperación entre electrones, núcleos o moléculas— ayudan a descifrar aspectos esenciales de los sistemas sociales y económicos así como el comportamiento y la misma naturaleza de los seres vivos. Esta circunstancia y la estrategia que se ha venido siguiendo para lograr responder a esas preguntas pueden ilustrarse con sencillos ejemplos. Así, vamos a repasar brevemente algunos casos de estudio en los que, partiendo de una hipótesis plausible, se comprueba, de acuerdo con la observación, cómo todo o parte del complejo comportamiento global de un objeto es consecuencia, generalmente inesperada, de pautas locales de cooperación entre sus elementos. Se espera que estudios de este tipo vayan abriendo en los próximos años nuevas puertas al conocimiento completando así las perspectivas que en la actualidad nos ofrece la ciencia (Penrose 2006).

Extinción de dinosaurios

Un caso sencillo de esa estrategia sigue la hipótesis de que la evolución biológica no es gradual sino intrínsecamente intermitente. Se supone, de acuerdo con indicios claros encontrados en el estudio sistemático de fósiles marinos, que los cambios evolutivos son generalmente suaves, aunque esporádicamente interrumpidos por grandes eventos. Según esto, no sería necesario invocar dramáticos cataclismos externos (tales como choques de meteoritos, cambios climáticos o erupciones volcánicas) para explicar masivas mutaciones y extinciones como la divulgada desaparición de los dinosaurios —con el 70% de las especies— hace docenas de millones de años. Para determinar si esta interpretación intrínseca de un cambio tan grande es plausible, Per Bak y Kim Sneppen (Bak 1996, Marro 2008) han propuesto una, digamos, “metáfora matemática”. Se trata de un modelo mínimo que recrea una especie de planeta virtual con muchas especies que coexisten. Por sencillez, cada especie se supone caracterizada por una cualidad única, a interpretar como su grado de adaptación al medio o su éxito reproductor, que se representa mediante un número elegido al azar. En cada generación, desaparece la especie menos adaptada —acorde con el principio de Darwin de que las especies débiles tienen mayor probabilidad de mutar— y dos que dependen de ella. Las reemplazamos por otras tres especies con grados también elegidos al azar, volvemos a buscar la menos adaptada, la hacemos desaparecer con sus dependientes, y así sucesivamente veces y veces. Se observa de este modo que tienden a sobrevivir especies con un grado de adaptación que oscila alrededor de un valor alto aunque, sorprendentemente, de tiempo en tiempo, un cierto número de ellas —a veces, una parte importante de todas— desaparece repentinamente. Se comprueba que los cambios, sean pequeños o grandes, son consistentes con los datos obtenidos del estudio de fósiles. La metáfora, aun siendo tan sencilla, cuestiona esa tendencia a creer que los cambios grandes en un ecosistema han de ser consecuencia de catástrofes u otras perturbaciones de origen externo.

La herramienta para llegar a esta conclusión ha sido una simple caricatura de la realidad. El investigador tendrá ahora que completarla (hasta tener un buen retrato) si aspira a explicar la evolución real de nuestros ecosistemas. Sin embargo,

aparte de sembrar dudas acerca de otros populares posibles orígenes de la desaparición masiva de especies, la metáfora nos enseña que reglas locales sencillas, sin otros añadidos, son capaces de producir un comportamiento global complejo. También sugiere que, aunque conociéramos todas las “leyes fundamentales” —esas que controlan la cooperación local entre los constituyentes de los objetos naturales— el mundo podría seguir mostrándosenos oscuro y misterioso; hay que comprender los efectos que emergen de esa cooperación. La ciencia notó esta necesidad hace unas décadas, y viene consiguiendo profundizar en esa estrategia gracias al *uso creativo de computadoras*, esto es, diseñando modelos para simular cooperación en la memoria de un ordenador. Esta actividad científica ha llegado a ser tan importante que, de hecho, en parte motiva por sí sola el constante desarrollo de más potentes y sofisticadas computadoras.

Comportamiento gregario

La estrategia que acaba de perfilarse también permite explorar el origen de otras observaciones como, por ejemplo, el comportamiento animal en manada. Son familiares esas grullas en migración formando una perfecta uve hasta su destino (Marro 2008), los avances de las plagas de langostas del desierto, y las evoluciones en respuesta a sus depredadores de bancos de peces y de bandadas de estorninos (Marro 2011), pero ¿existen comportamientos similares en los humanos? Una metáfora matemática propuesta por Kai Nagel y Michael Schreckenberg (Kerner 2005) demuestra que los clásicos embotellamientos de tráfico y sus complejas consecuencias, como las molestas ondas “para-y-sigue”, se llegan a comprender perfectamente suponiendo que los conductores, haciendo irrelevantes sus inteligencias individuales, se comportan inconscientemente en promedio según ciertas reglas locales muy simples. Con esta hipótesis, se ha llegado a descubrir que el paso de tráfico libre a congestionado tiene profundas similitudes con la transformación de agua en hielo. Parece que los humanos al volante de un vehículo, cuando hemos de coexistir con otros muchos en una carretera, que siempre es un medio limitado, tienen pautas de conducta estructuradas, restringidas y similares a las que rigen el comportamiento de las inanimadas moléculas al disminuir la temperatura del agua (Garrido, Muñoz y Marro 2005).

También ha resultado ser fiel y útil la similitud entre el movimiento de las moléculas de un fluido y el de una multitud condicionada por el pánico. Predominan en este caso ciertas tendencias psicológicas y una intensa interacción entre personas próximas, resultando una situación de hecho como la que producen las fuerzas entre moléculas pues —como ironizaba el premio Nobel Richard Feynman— un fluido no es sino un conjunto de *“partículas que se mueven sin cesar, se atraen al ser separadas un poco y se repelen al ser acercadas”*. Llevada esta similitud a una computadora, se ha concluido sobre el diseño de las salidas y las condiciones óptimas para desalojar a una muchedumbre de un recinto. También aquí se producen dos estados cualitativamente distintos, uno con individuos bien diferenciados atravesando ordenadamente la salida y otro en el que la manada, atropellada e ineficazmente, sale a borbotones como haría un gran rebaño de ovejas perseguidas por el lobo. Comparando simulaciones con datos reales —extraídos, por ejemplo, de los fatales incidentes de 2006 en La Meca, cuando casi dos millones de peregrinos transitaban por el puente Jamarat— se mejoran los diseños de los pasos estrechos y se predicen situaciones de peligro sin más que vigilar parámetros que caracterizan globalmente a la muchedumbre, igual que se venía haciendo para resolver problemas con aguas turbulentas.

Sorprendente que, siendo individualmente racionales, no sepamos evitar un gregarismo que conduce a estas situaciones contrarias tanto a los intereses individuales como a los colectivos. Es como si nuestra supuesta independencia fuera limitada por otros hasta el punto de poder acabar como un rebaño de animales irracionales. Resulta por esto interesante la metáfora en un modelo de Víctor Eguíluz y Martin Zimmermann que muestra cómo el gregarismo también podría ser una propiedad intrínseca del intercambio cooperativo de bienes materiales entre humanos. Imaginemos el conjunto de muchos agentes que, en relación con las acciones de una empresa, tienen la oportunidad de ser compradores o vendedores, o bien quedan inactivos. Por otra parte, dos agentes cualesquiera pueden estar aislados o bien conectados y, en este caso, pertenecen a un subgrupo que comparte la misma información. Inicialmente, todos los agentes son inactivos y están aislados. Elegimos uno al azar y, con cierta probabilidad, digamos p , se hace activo o, más concretamente, el agente compra o vende con igual probabilidad, $p/2$. Si no se hizo activo, esto es, con la probabilidad

complementaria, $1-p$, el agente elegido al azar es conectado a otro también elegido al azar de modo que, teniendo la misma información, adquieren el mismo estado. Todos los agentes que pertenecen al subgrupo en ese momento ejecutan instantáneamente la misma acción. ¿Se está simulando así un comportamiento gregario! Este proceder resulta condicionar el precio de las acciones que, como muestran simulaciones en computadoras (Marro 2008), cambia con el tiempo de forma prácticamente indistinguible, en un sentido estadístico, del cambio típico que sigue una cotización bursátil, incluyendo esos desplomes inesperados que, de vez en cuando, son causa de terror en las finanzas. En definitiva, otra vez, la conclusión es desconcertante. El modelo sugiere que el gregarismo de agentes que generalmente basan sus decisiones en rumores u otra información incompleta o defectuosa produce una condición especial que, aun pudiendo argumentarse que interesa para así lograr una mejor auto-regulación de los mercados, es capaz de inducir fluctuaciones de amplitud extraordinaria que, aparte de inesperadas, parecen indeseables. ¿Confiamos el dinero a un sistema peligrosamente caracterizado por una enorme inestabilidad potencial!

El cerebro y sus funciones

Si parece fundado dudar de la racionalidad global de un grupo de humanos, es innegable que sus cerebros son individualmente máquinas envidiables. Todavía no sabemos construir una computadora capaz de llevar a cabo tareas cerebrales, tan normales para nosotros, como coordinar el sistema nervioso, constantemente procesar una enorme cantidad de información y controlar así el comportamiento individual, o reconocer después de docenas de años a un amigo de la niñez que se presenta inesperadamente envejecido ante nosotros. Para desempeñar estas tareas, nuestro cerebro se ha dotado de cien mil millones de células nerviosas, llamadas neuronas, que cooperan intensamente —unas 10.000 conexiones, llamadas sinapsis, salen de cada neurona hacia las otras transmitiendo impulsos a 400 km/h. Se trata, pues, de un objeto cuyos elementos constante e íntimamente se relacionan.

En efecto, hoy se prevé la proximidad de un importante avance en la comprensión de las funciones del cerebro siguiendo la estrategia que hemos ilustrado. El premio

Nobel Santiago Ramón y Cajal describía las neuronas como “*células largas y filiformes, ... misteriosas mariposas del alma, cuyo batir de alas puede un día —¿quién sabe?— clarificar el secreto de la vida mental*”. Si el siglo pasado supuso un desarrollo extraordinario de la física y de la tecnología en ella basada, éste sin duda satisfará la curiosidad de Cajal, y clarificará las muchas incógnitas que vienen planteándose en neurociencia a la vez que se propician aplicaciones tecnológicas todavía inimaginables. Es seguro que, a lo largo de este camino, va a ir profundizándose en las consecuencias que tiene la colaboración entre muchas neuronas y sinapsis, un objetivo que ya se beneficia de la comparación entre lo que dicen los modelos que así van implementándose y una enorme cantidad de datos, ya obtenidos y por obtener gracias a la popularización de sofisticados dispositivos y técnicas en laboratorios y hospitales.

El hecho es que hoy ya empezamos a saber cómo una máquina con mínimos indicios de razón, inteligencia, conciencia y emociones ha de hacer para aprender, almacenar, recordar y prestar atención, y empezamos a comprender seriamente todos estos procesos gracias al estudio en computadoras de sencillos modelos metáfora como los descritos aquí. Hoy se piensa que así llegaremos a descifrar importantes cuestiones, desde el mecanismo de la conciencia hasta las diferencias esenciales, si las hay, entre nuestro cerebro y el de primates poco evolucionados. Si no contásemos con esta estrategia en el estudio de las funciones del cerebro, seríamos tan incapaces como un hipotético extraterrestre que, abandonado a su curiosidad frente a una potentísima computadora, quisiera comprender sus efectos sin más que medir corrientes en decenas de billones de terminales.

Conclusión

Se sigue en definitiva que un “sistema social” —que, para nuestros propósitos aquí, basta con imaginar como un conjunto, suficientemente grande, de humanos en interacción— es *complejo* en el sentido que aquí se ha explicado, esto es, muestra una fenomenología, un comportamiento global emergente totalmente inesperado que es consecuencia de la cooperación entre individuos. Como hemos dicho, sorprende entonces que, siendo los elementos individuos aparentemente libres e inteligentes en estos casos, sus propiedades emergentes se obtengan suponiendo

que sus interacciones son relativamente simples y parecidas a las que necesitamos para comprender la materia inanimada. Todavía no sabemos bien, esto es, con suficiente rigor matemático, qué detalles básicos (digamos, “microscópicos”) de las interacciones entre los individuos determinan el comportamiento global (digamos, “macroscópico”) del conjunto, pero empieza a ser un hecho bastante general el que modelos cooperativos que subestiman y llegan a negar la individualidad inteligente consiguen describir aspectos de la realidad social (Mantegna y Stanley 2000; Garrido y otros 2005). ¿Cómo explicarlo?

Es cierto que bastantes de nuestros comportamientos o acciones individuales podrían estar genéticamente condicionadas, quizá en mucha mayor medida de lo que creemos, de modo que resultaría una conducta media de la que apenas diferiría el individuo. Pero hay algo más. Parece como si, en presencia de intensa cooperación entre muchos sujetos, las libertades individuales de resolución tendieran a compensarse hasta desaparecer su efecto neto en la actuación del conjunto. A los físicos no nos extraña demasiado este posible menoscabo de la naturaleza humana, pues es perfectamente consistente con dos hechos.

Uno de estos hechos, hoy bien establecido, es la propiedad de universalidad que parece ser una propiedad íntima de la naturaleza, esto es, cierta insensibilidad del comportamiento macroscópico a detalles microscópicos en sistemas complejos. El otro se refiere a que las moléculas de un gas, al cooperar muchas de ellas, pueden perder propiedades individuales. Es el caso de algunas simetrías como, por ejemplo, la reversibilidad temporal individual, que se pierde en beneficio de la irreversibilidad que caracteriza globalmente al gas. Es previsible que estas propiedades generales de los sistemas materiales se trasladen a los sistemas sociales.

Aparte de este comentario para la ocasión, me gustaría terminar volviendo a mi pregunta inicial: ¿Existe un principio único que genera orden a partir de cooperación entre constituyentes? Pues bien, una serie de conceptos aparecidos recientemente en ciencia —entre los que destacan complejidad, emergencia, universalidad, criticalidad, cambios de fase, no-equilibrio, correlación, auto- semejanza, invariancia y leyes de escala, renormalización,...— parecen empezar a conformar ese principio. Y es notable que los “modelos metáfora” parecen estar en

la misma base de esa nueva ciencia en desarrollo. Haciendo un uso intensivo de computadoras, ésta ha de afrontar de modo principal el estudio de la cooperación entre los constituyentes de los sistemas que uno quiera llegar a comprender, tomando para ello como guía lo que la física ha hecho con notable éxito para desentrañar los misterios de la materia y de la radiación en el último siglo. El desarrollo de esta nueva ciencia, que fundamentará la estrategia que aquí hemos ilustrado, requiere la colaboración entre científicos de todos los campos del conocimiento, de modo que está llamada a conseguir una comprensión más coherente del mundo en que vivimos.

Bibliografía

Bak, P. (1996), *“How Nature Works”*, Springer-Verlag, Nueva York.

Garrido, P.L., Muñoz, M.A., y Marro J. (2005), *“Modeling Cooperative Behavior in the Social Sciences”*, *AIP Conference Proceedings*, vol. 779, American Institute of Physics, New York.

Kerner, B.S. (2005), *“The Physics of Traffic”*, Springer-Verlag, Berlin.

Mainzer, K. (2004), *“Thinking in Complexity”*, Springer-Verlag, Berlin.

Mantegna, R.N. y Stanley H.E. (2000), *“Econophysics”*, Cambridge Univ. Press.

Marro, J. (2005), *“Nonequilibrium Phase Transitions in Lattice Systems”*, Cambridge Univ. Press.

——— (2008), *“Física y Vida — De las relaciones entre física, naturaleza y sociedad”*, Editorial Crítica, Barcelona. Este libro, combinado con el sitio web <http://ergodic.ugr.es/jmarro/FyV/>, quiere también servir de ayuda al docente interesado en transmitir estos conocimientos.

——— (2011), *“Los estorninos de San lorenzo —o cómo mejorar la eficacia del grupo”*, *Revista de Física, Real Sociedad Española de Física*, vol. 25-2, Abril-Junio.

Penrose, R. (2006), *“El camino a la realidad”*, Debate, Barcelona.

Breve CV

Joaquín Marro (Huesca, 1945) se doctoró en física teórica (Barcelona, 1973) y en física computacional (Nueva York, 1975). Profesor en distintas Universidades de Europa y los EE UU, es ahora catedrático en la Universidad de Granada donde dirige el Departamento de Electromagnetismo y Física de la Materia. Ha fundado la reunión periódica *Granada Seminar* y, con otros colegas, el *Instituto Carlos I de Física Teórica y Computacional*, hoy referentes internacionales. Representante español en varios comités científicos, es autor de dos centenares de trabajos y libros de investigación y divulgación. Sus estudios se centran actualmente en el modelado matemático de las propiedades de la materia y de las funciones cerebrales, así como en los fundamentos y aplicaciones de la física estadística. Otros detalles de su actividad pueden verse en <http://ergodic.ugr.es/jmarro/>.