

Juan M.R. Parrondo

Flujos y redes: la ciudad y la ciencia de los sistemas complejos.

Pero las máquinas de la naturaleza, es decir, los cuerpos vivos, son también máquinas en sus partes más pequeñas ad infinitum. Esto es lo que constituye la diferencia entre la naturaleza y la técnica, esto es, entre la técnica divina y la nuestra.

Leibnitz

Desde hace un par de décadas se viene desarrollando un nuevo campo de investigación, originado en la física y la matemática aplicada pero con una decidida vocación interdisciplinar. Es la física o ciencia de los sistemas complejos. En las revistas de física se pueden leer artículos con títulos tan sorprendentes como estos: “Un enfoque estadístico del tráfico urbano”, “Organización jerárquica de ciudades y naciones”, “Leyes de potencias en la población de ciudades”, “Modelos de procesiones de hormigas y de tráfico: similitudes y diferencias” y en esta nueva ciencia caben investigaciones sobre mercados financieros y redes urbanas, sobre colonias de hormigas, la organización de células y tejidos, los flujos de información en Internet, modelos matemáticos para estudiar el comportamiento del cerebro, la propagación de la cultura, la organización de los recursos humanos de una empresa, las estrategias migratorias de los pájaros o la evolución del lenguaje.

Esta lista de temas, que no es ni mucho menos completa, parece admitirlo todo y es difícil creer que pueda dar lugar a una única disciplina coherente. En cierto modo es así. No se puede negar que la física de los sistemas complejos elige en ocasiones sus temas con una cierta obsesión por la originalidad y el impacto mediático. Sin embargo pronto veremos que en todos ellos hay algunas características comunes y que, gracias a ello, puede ser interesante, y hasta productivo, que intercambien ideas los científicos que se dedican a asuntos tan dispares.

Para convencerse de ello, basta echar un vistazo a la organización y las actividades del Santa Fe Institute (www.santafe.edu), uno de los centros pioneros en el mundo en la ciencia de los sistemas complejos. En él trabajan sobre todo físicos, informáticos y biólogos y sus líneas de investigación son la neurociencia cognitiva, la computación en sistemas biológicos y físicos, las interacciones sociales y económicas, las dinámicas evolutivas y la dinámica de redes.

Alguna consistencia debe tener entonces esta nueva ciencia. Pero, ¿qué pueden tener en común todos los temas que hemos ido mencionando? ¿cómo puede haber una disciplina más o menos compacta y coherente que sólo esté definida por la complejidad de los sistemas que estudia? ¿Es la física de los sistemas complejos una mera operación de marketing científico?

¿Y que tiene que ver todo esto con la ciudad? ¿Puede la ciencia de los sistemas complejos decirnos algo que no sepamos por otros medios acerca de la organización y la dinámica de la ciudad?

Voy a defender la idea de que la física de los sistemas complejos puede conducir, o quizá ya lo esté haciendo, a un cambio de paradigma en la imagen de la naturaleza que propone la ciencia. Puede suponer el fin del mecanicismo ingenuo de Newton y Descartes y la aceptación dentro

del alcance del análisis científico de aquello que Leibnitz llamaba “las máquinas infinitas”. En el mundo mecanicista de Newton y Descartes sólo caben las máquinas finitas, aquéllas en las que cada parte tiene una función simple y precisa y está por ello sometida a un comportamiento que es significativo incluso cuando esa parte se separa del resto. Los sistemas complejos, por el contrario, son máquinas en donde cada parte no explica nada: el vagar de una sola hormiga alrededor del hormiguero no nos dice nada acerca de la compleja estrategia que éste ha puesto en marcha para alcanzar una fuente de comida, ni la actividad eléctrica de una neurona nos dice nada acerca de los pensamientos y los recuerdos que en ese preciso instante están recorriendo la mente de un gato o un ser humano.

La ciudad tiene mucho que ver con todo este proceso, con este cambio de paradigma. Como inspiración, como imagen y como objeto de estudio. La ciudad se comporta como un organismo autónomo, en el sentido de que lo que en ella se construye no se atiene a las funciones para las que fue concebido sino que se sumerge en una red de flujos impredecibles. La ciudad diseñada como máquina finita y cartesiana se ha convertido (o quizá siempre lo fue) en ser vivo, en máquina infinita.

A través de varios ejemplos, algunos de ellos relacionados con la ciudad, trataré de dar una idea de qué es la ciencia de los sistemas complejos. Hay que tener en cuenta, no obstante, que se trata de un campo que admite sólo una cierta sistematización, ni mucho menos completa. No es una ciencia al uso que se organice mediante divisiones nítidas y un catálogo bien delimitado de metodologías. Por ello, la mejor forma de adquirir un idea de qué es la ciencia de los sistemas complejos es dejarse llevar por los ejemplos y las aplicaciones. Una vez realizado este recorrido, analizaremos cómo está cambiando la ciencia en general y el análisis científico de la realidad a raíz de la irrupción y el desarrollo de la física de los sistemas complejos y si este cambio puede extenderse a la visión que cada uno, sepamos o no algo acerca de esta física, tenemos de lo colectivo o a la visión que se nos va imponer si es que la física de los sistemas complejos acaba por influir sobre los modos de organización de lo colectivo.

1. La ciencia de los sistemas complejos: una introducción

Sí es posible encontrar una serie de aspectos comunes a todos los sistemas complejos que hemos ido citando. Y son estos aspectos comunes los que hacen que ciertas herramientas diseñadas por la física sean útiles para su análisis. El más fundamental de estos aspectos es que un sistema complejo está compuesto por muchas unidades o agentes. En el tráfico urbano, los coches; en el cerebro, las neuronas; en una colonia, las hormigas; en la bolsa, los inversores. La interacción entre estas unidades o agentes genera los llamados comportamientos colectivos y se espera de ellos que sean un producto genuino de la interacción, es decir, no una mera suma de los comportamientos individuales.

En ocasiones el comportamiento colectivo puede ser más sencillo que el individual, como si el gran número de agentes y su interacción mutua limara todos los detalles y singularidades de cada uno de ellos. Es el caso del tráfico, en donde no importa si un conductor tiene prisa porque necesita ir al hospital o si alguien conduce con tristeza; o el de la bolsa, en cuyo análisis se ignora el miedo o el arrojo de un broker. Sin embargo, en otras ocasiones el comportamiento colectivo puede ser mucho más complejo del que se esperaría de los comportamientos individuales. Así ocurre en el cerebro, en el que simples disparos eléctricos de las neuronas y algunos flujos hormonales conducen a fenómenos cognitivos tan complejos como la sensibilidad ante un concierto de Mozart o la conciencia. Y es el caso también de una colonia de hormigas, cuyos comportamientos individuales simples pueden dar lugar a complejas estrategias colectivas para la búsqueda de comida o para la defensa del hormiguero.

Física Estadística

La física ha tratado desde finales del siglo XIX con sistemas compuestos por muchas unidades simples y ha buscado su comportamiento colectivo. La materia no es más que un conjunto de moléculas que interactúan entre sí: se atraen si se encuentran a una distancia moderada, se repelen si se encuentran muy cerca. El comportamiento simple de atracción y repulsión, gobernado por las leyes de Newton o por las de la mecánica cuántica, da lugar a diferentes comportamientos colectivos: alguna materia se organiza como un sólido, otra como un líquido, otra como un gas. Que el agua a quince grados sea líquida y que sin embargo sea sólida a cero grados es debido a un cambio en el comportamiento colectivo, puesto que las moléculas de agua no cambian al variar la temperatura; siguen siendo las mismas, a cero y a quince grados.

A finales del diecinueve, con la teoría molecular de la materia ampliamente aceptada, los físicos se dispusieron a la difícil tarea de explicar por qué el agua es líquida a una cierta temperatura y sólida a una temperatura más baja, utilizando para ello únicamente las leyes de Newton, es decir, suponiendo tan sólo que las moléculas se atraen y se repelen como si fueran planetas. En ese intento, Maxwell, Boltzmann y Gibbs establecieron las bases de la llamada física estadística.

La física estadística, además de crear un conjunto de ideas muy profundas y que tienen relevancia en problemas de carácter fundamental como la flecha del tiempo y el aumento paulatino de la entropía del universo, introdujo un estilo de pensamiento muy peculiar, en el que uno se acerca a la realidad teniendo presente tanto sus aspectos microscópicos como sus aspectos macroscópicos. Es decir, uno se acerca a ella con una especie de visión doble y paralela, en la que imagina las moléculas, vibrando y moviéndose con rapidez inusitada, y ve a un tiempo la consecuencia macroscópica de ese extraño y caótico mundo microscópico: que este cuerpo es sólido, que tiene esta textura, que el aire es gas, que el agua es líquida,...

¿Habría inspirado a Boltzmann y a su imagen del agua y sus moléculas, el flujo de peatones, carros y caballos por la ciudad de Viena? ¿O, al mismo tiempo que crecía en su cabeza este estilo de pensamiento, esta imagen de la materia, se generaba una forma similar de ver esos flujos de transeúntes? Lo que sí es cierto es que las técnicas matemáticas que usaron Boltzmann y Maxwell debían mucho de su desarrollo a la ciudad y los estados-nación que se crearon en el diecinueve. Estas técnicas son la estadística matemática y la teoría de la probabilidad, que sirvieron durante todo el siglo para analizar censos, realizar encuestas, formular pretendidas leyes sociológicas y hasta para calcular el tamaño adecuado de un jurado para minimizar su probabilidad de error¹.

La física estadística se armó así con un potente arsenal de herramientas para deducir y analizar el comportamiento colectivo de una gran cantidad de unidades simples. A finales del diecinueve había conseguido explicar las propiedades de los gases y cómo éstos se convierten en líquidos a una determinada temperatura y presión. A principios del veinte, se aplicó al estudio de los imanes, que no son más que un conjunto enorme de pequeñas brújulas (una por molécula) que tratan de orientarse en la misma dirección que sus vecinas. De nuevo muchos agentes que interactúan entre sí.

¹ I. Hacking. *La domesticación del azar. La erosión del determinismo y el nacimiento de las ciencias del caos*. Gedisa, Barcelona, 1991.

Modelos

El modelo matemático simplificado que se creó para estudiar los imanes —el *modelo de Ising*— ha sido una de las puertas por las que la física estadística ha extendido su campo de acción más allá de la propia física. El modelo es muy sencillo: es un conjunto de brújulas dispuestas en una red y que pueden apuntar sólo hacia arriba o hacia abajo. El modelo es completamente equivalente a un conjunto de puntos que pueden ser rojos o azules. A intervalos regulares de tiempo los puntos cambian de rojo a azul y viceversa de modo aleatorio, pero con una cierta predisposición a tomar el color de los puntos vecinos. La aleatoriedad en el cambio de color representa el papel de la temperatura. Todas las moléculas, por el hecho de estar inmersas en un medio a una cierta temperatura, tienen un comportamiento aleatorio que es más azaroso e impredecible cuanto mayor es la temperatura. Por el contrario, la predisposición a que el color de un punto sea igual al de sus vecinos da cuenta de la interacción entre ellos. Este modelo tan simple reveló pronto un comportamiento muy rico. Por debajo de una cierta temperatura —la *temperatura crítica*— el sistema se ordena, la mayoría de los puntos se vuelven o rojos o azules y la decisión de adoptar un color u otro se debe a una amplificación de pequeñas fluctuaciones, del azar térmico. En la temperatura crítica el sistema se vuelve enormemente sensible a cualquier pequeña perturbación, ya que es a esta temperatura cuando el sistema comienza a “decidirse” por uno de los dos colores.

El modelo reveló que los comportamientos colectivos dependen de la red de interacciones más que de los detalles de la propia interacción entre los agentes —las brújulas o los puntos, en este caso—. Se descubrió que, por ejemplo, si las brújulas se disponen en una línea y sólo interactúan con sus dos vecinas, el sistema es incapaz de ordenarse, la aleatoriedad vence siempre a la tendencia de las brújulas a puntar en el mismo sentido; mientras que sí pueden hacerlo si se disponen en una malla plana en la que cada brújula interactúa con cuatro vecinas, o en una malla tridimensional en donde lo hace con seis; o si cada brújula interactúa con todo el resto. La forma de la red de conexiones o interacciones determina el comportamiento colectivo tanto o más que la propia naturaleza de las interacciones.

La sencillez del modelo de Ising, y el hecho de que gracias a él se descubriera que el detalle de la interacción no afecta demasiado al comportamiento colectivo, es lo que lo ha posibilitado que sus aplicaciones se extendieran más allá de la física. Hopfield², por ejemplo, introdujo un modelo simplificado para el cerebro que consistía en neuronas binarias, es decir, neuronas que o bien disparan un impulso eléctrico o bien no lo hacen, y que interactúan entre sí de modo parecido a como lo hacen los puntos en el modelo de Ising. Otros han utilizado el modelo para estudiar la evolución de la opinión pública, que también puede interpretarse como el resultado de interacciones entre individuos binarios³.

El modelo de Ising ilustra la mayor parte de las características de la ciencia de los sistemas complejos: 1) Modelos matemáticos muy simplificados, en los que la simplificación afecta sobre todo a los agentes y a su interacción. 2) Relevancia de la *topología* de la red de interacciones, es decir, de su dimensión, de la densidad de conexiones, etc. 3) Existencia de transiciones de fase y situaciones críticas en donde se amplifican las pequeñas fluctuaciones y aparecen fractales y *leyes de potencias*. 4) Relevancia de las fluctuaciones o el azar. Hemos discutido ya el primero de estos aspectos. Veamos ahora el resto.

² J.J. Hopfield. *Neural networks and physical systems with emergent collective computational properties*. Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA, vol. 79, pp. 2554 – 2588 (1982).

³ F. Schweitzer y J. Holyst, *Modelling Collective Opinion Formation by Means of Active Brownian Particles*, European Physical Journal B vol 15, pp. 723-732 (2000).

Redes

La importancia de la red de interacciones ha creado toda una disciplina dedicada exclusivamente al estudio de sus propiedades. Hace unos pocos años, Watts y Strogatz⁴ introdujeron las llamadas *redes de pequeño mundo*, que también podrían haberse traducido como *redes de mundos pañuelo*, puesto que el nombre inglés proviene de la expresión “what a small world!” que podría traducirse al castellano como “¡el mundo es un pañuelo!”.

El primer ejemplo de red de pequeño mundo lo encontró Brett Tjaden con un sencillo ejemplo que es ya clásico: *six degrees of separation*. Tomó a un actor secundario de Hollywood, Kevin Bacon, y a continuación asignó a cada actor un número, el *número de Bacon*, de la siguiente manera: si el actor había trabajado en una película con Kevin Bacon, su número de Bacon es 1; si ha trabajado en una película con algún actor que haya trabajado en otra película con Kevin Bacon, entonces su número es 2; y así sucesivamente. Es decir, el número de Bacon nos dice lo “lejos” que se encuentra un actor de haber trabajado con Bacon. Tjaden descubrió que, a pesar de la insignificancia de Bacon en la historia del cine, no había ningún actor norteamericano que tuviera un número de Bacon superior a 4. El número de Bacon de Pepe Isbert, por ejemplo, es 3, puesto que trabajó con Franck Villard en *Noches Andaluzas* en 1953; éste a su vez con Colleen Camp en *Apocalypse Now* en 1979; y ésta con Bacon en *Atrapados* en 2002. Si les divierte pueden consultar la conexión de cualquier actor de la historia del cine con Bacon en el *oráculo de Bacon*, un programa diseñado en la Universidad de Virginia (www.cs.virginia.edu/oracle).

El juego de Bacon fue el primer ejemplo de red de pequeño mundo, redes en las que, sin tener un gran número de conexiones, se puede ir de un punto a otro (o de un agente a otro) en sólo unos pocos “saltos”. En los últimos años, se ha investigado el comportamiento de muchos modelos definidos sobre redes de pequeño mundo: propagación de enfermedades infecciosas, orden y desorden en un modelo de Ising en donde las brújulas interactúan según una red de pequeño mundo, juegos, propagación de problemas y soluciones en una organización empresarial distribuida según una red de pequeño mundo, etc.

Pero la ciencia de los sistemas complejos no sólo estudia las características de las redes y de los fenómenos que ocurren en ellas, sino la propia evolución de estas redes. Por ejemplo, los físicos Eguiluz, Zimmermann y San Miguel y el antropólogo Cela-Conde estudian cómo cambia una red de individuos que juegan unos contra otros el *dilema del prisionero*, un juego matemático muy simple que esquematiza estrategias de “traición” y de “colaboración”⁵. En el modelo los jugadores imitan las estrategias de aquellos que obtienen la mayor ganancia en el juego. Pero la red de interacciones va cambiando en el tiempo: se crean nuevas interacciones al azar, los jugadores “rompen relaciones” con aquellos con los que pierden y refuerzan las interacciones que les benefician. La red de interacciones va así cambiando y, a pesar de que el modelo es muy simple, se reproducen estructuras sociales y se pueden identificar algunos agentes como líderes (porque interactúan con un gran número de agentes que les imitan), conformistas (porque imitan constantemente al vecino más exitoso) y explotadores (cuya estrategia es siempre la traición y se benefician de colaboradores con los que se encuentran al azar).

Aunque pueda parecer en ocasiones un puro divertimento, la ciencia de las redes se comienza a aplicar en situaciones reales, para optimizar una red de comunicaciones o incluso el organigrama

⁴ *Small-Worlds* by Duncan Watts, Princeton University Press (1999).

⁵ V.M. Eguiluz, M.G. Zimmermann, C.J. Cela-Conde, M. San Miguel. *Emergence of role differentiation in the dynamics of social networks*. Preprint.

ma de una gran empresa. Más tarde comentaremos brevemente un ejemplo aplicado al tráfico urbano. Tiene además en Internet un “cobaya” inagotable, en donde se puede estudiar en detalle la topología y los flujos de información que atraviesan la red.

Transiciones

El cerebro es también una gran red de agentes conectados entre sí y comienza a haber evidencia de que se trata de una red de pequeño mundo. Pero el estudio de las redes de neuronas como una pequeña modificación del modelo de Ising se remonta a los años 80. Al igual que en el modelo de Ising se produce una transición de un estado ordenado a uno desordenado, en las redes de neuronas estas transiciones se producen entre un sistema capaz de recordar con precisión y uno cuyos recuerdos se confunden. El modelo es de nuevo muy simple y “recordar” significa únicamente que ante un cierto estímulo el sistema evoluciona hacia algún patrón almacenado en el mismo con anterioridad. Cuando el número de patrones que se tratan de almacenar es muy grande, el sistema se confunde y los mezcla. Y el modo cómo se produce esta transición de un sistema con memoria a uno sobrepasado por lo que pretende recordar tiene muchas similitudes con la transición de un líquido a un gas. Es lo que en física estadística se bautizó como *transición de fase*. Aunque hay diferentes tipos de transiciones de fase, la principal característica es una gran sensibilidad del sistema cuando se produce la transición. Esta sensibilidad puede dar lugar a respuestas bruscas, como una repentina confusión de los patrones almacenados en una red neuronal.

No es muy difícil entender por qué los comportamientos colectivos en sistemas que están compuestos por muchos agentes suelen sufrir este tipo de transiciones. Algunos de estos comportamientos colectivos son el resultado de una amplificación de lo que ocurre con unos pocos agentes. Por lo tanto, el comportamiento colectivo será muy sensible a los pequeños detalles y a las mínimas asimetrías.

Por ejemplo, si colocamos varios puntos de comida alrededor de un hormiguero se formará una única procesión de hormigas dirigida hacia el punto más cercano. Si dos de los puntos de comida están a la misma distancia entonces la elección será aleatoria, dependerá de cuántas hormigas, en su vagabundeo casi errático, encuentren uno u otro punto. El comportamiento colectivo es muy sensible y rompe la simetría entre los dos puntos de comida que, *a priori*, son igual de apetecibles.

Los modelos matemáticos para el estudio del tráfico urbano también presentan transiciones de fase. El tráfico es fluido cuando la densidad de coches está por debajo de un cierto umbral, pero, al superarlo, se produce de forma brusca un atasco⁶. El fenómeno es muy parecido a cómo el agua líquida se convierte en hielo. De nuevo una transición de fase, un cambio brusco y cualitativo en el modo como se organiza un conjunto formado por un gran número de agentes: coches o moléculas.

Como hemos visto, en estas transiciones los detalles microscópicos se amplifican hasta alcanzar dimensiones macroscópicas. La forma en que se produce esta amplificación da lugar a las llamadas estructuras *fractales*. En el modelo de Ising por ejemplo, en el momento en que el sistema empieza a ordenarse, todos los puntos comienzan a ser mayoritariamente rojos o azules como resultado de la amplificación de una mínima y aleatoria desviación hacia uno de los dos colores. Pues bien, este comienzo, esta amplificación, se realiza mediante “manchas” con forma fractal, es decir, manchas que son similares a sí mismas cuando se ven aumentadas.

⁶ J.M. Molera, F.C. Martínez, J.A. Cuesta y R. Brito. *Theoretical approach to two-dimensional traffic flow models*. Physical Review E vol. 51, pp. 175-187 (1995).

Esto no dejaría de ser una simple curiosidad si no fuera porque la fractalidad es fácil de detectar desde el punto de vista matemático, a través de las llamadas *leyes de potencias*, y porque éstas aparecen en las situaciones más dispares, desde el tamaño de las ciudades hasta la distribución de ingresos en las familias de un país o de frecuencias de uso de las palabras ⁷. Comentaremos el primero de estos ejemplos más tarde.

Azar

Y, por último, el azar. En un sistema complejo el azar es relevante por distintas razones. Porque, como hemos visto, el comportamiento colectivo es en ocasiones producto de la amplificación de una fluctuación. Y porque el comportamiento de cada agente, puesto que está influido por el resto y esa influencia es impredecible, es aleatorio.

Quizá el resultado más sorprendente del estudio del azar en la física de los sistemas complejos es el descubrimiento de que la aleatoriedad y el ruido pueden tener un papel constructivo y facilitar el orden en un sistema. Este papel se ha encontrado en algunos fenómenos cognitivos relacionados con la percepción. En un experimento realizado en la Universidad de Missouri, se ha demostrado que un determinado pez, el pez raqueta, caza de forma más eficiente si se añade ruido al medio en donde se encuentra⁸. Cada vez hay una mayor convicción de que el cerebro utiliza el azar y el ruido para sus procesos en lugar de evitarlo y es probable que ocurra lo mismo con algunos mecanismos celulares.

2. La ciudad en la ciencia de los sistemas complejos

Tal y como hemos descrito la física de los sistemas complejos, no es de extrañar que la ciudad sea parte importante de su larga lista de aplicaciones: el tráfico, las migraciones, la formación de las ciudades, se han estudiado utilizando las técnicas de la física estadística, las transiciones de fase y las leyes de potencias.

Por ejemplo, una de las leyes de potencias más conocidas es la ley de Zipf para poblaciones de ciudades. Si se ordenan en una lista las ciudades de más a menos pobladas y se representa en una gráfica la población de cada ciudad en función del orden que ocupa en la lista, se obtiene una ley de potencias. Esto significa que si la representación se hace en *ejes logarítmicos* —ejes en donde las cantidades no saltan de unidad en unidad sino de 1 a 10, a 100, a 1000, etc. (cualquier hoja de cálculo permite esta opción)— el tramo central de la gráfica es una recta oblicua.

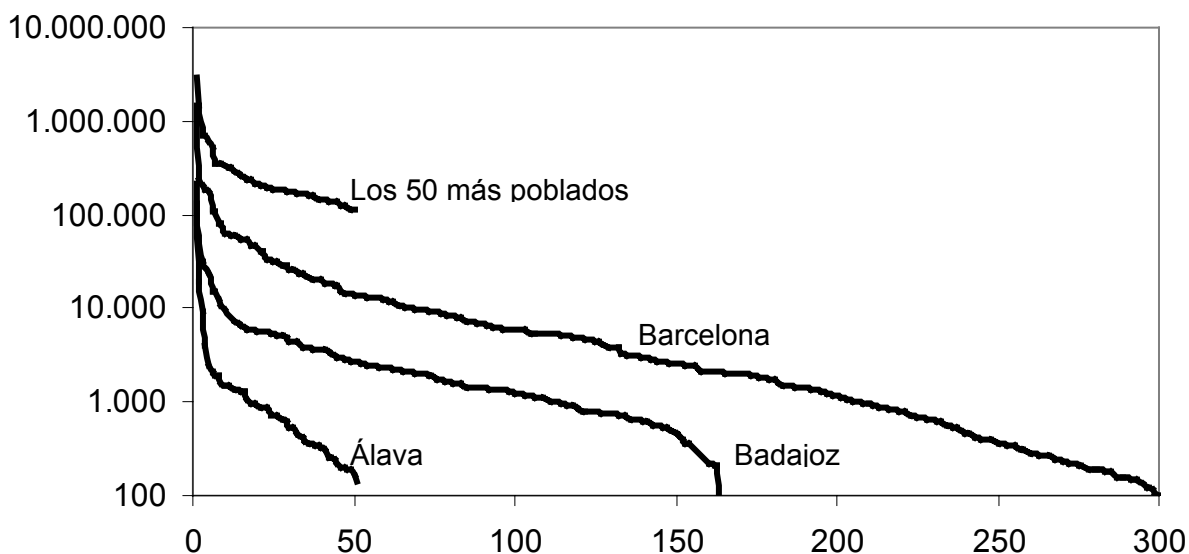
En la figura pueden observar la ley de potencias con datos extraídos del Instituto Nacional de Estadística para las poblaciones de varias provincias y de las 50 ciudades más pobladas de España. Salvo el caso de Álava, los tramos rectos son prácticamente paralelos. La figura nos dice por tanto que debe existir un mecanismo común en el modo como se distribuye la población o en el modo como se crean ciudades y pueblos. Un reciente modelo de migraciones entre poblaciones muestra que la ley de Zipf es incompatible con la suposición de que cada individuo toma la decisión de cambiar de ciudad aleatoriamente y sin interactuar con el resto de los habitantes⁹. Más aún, muestra que la ley es sólo compatible con decisiones que dependen de parejas de

⁷ B.B. Mandelbrot. *La Geometría Fractal de la Naturaleza*. Tusquets, 1997.

⁸ K. Wiesenfeld y F. Moss. *Stochastic resonance and the benefits of noise: From ice ages to crayfish and SQUIDS*. Nature vol. 373 pp. 33-36 (1995).

⁹ M. Marsili and Yi-Ch. Zhang. *Interacting individuals leading to Zipf's law*. Physical Review Letters, vol. 80 pp. 2741-2744 (1998).

individuos. Se trata únicamente de modelos y de especulaciones y todavía no disponemos de una teoría convincente que explique el origen de la ley. Aún así, se ha utilizado incluso para analizar y criticar políticas demográficas.



Hemos comentado ya la utilización de la física de los sistemas complejos para analizar el tráfico en la ciudad. Un caso curioso es la llamada *paradoja de Braess*, que muestra cómo al añadir una nueva vía en una red de tráfico se puede disminuir la eficiencia de la red¹⁰.

La ciencia de los sistemas complejos se ha aplicado fundamentalmente a problemas demográficos, de crecimiento urbanístico y de tráfico. No es casual: son los tres aspectos en donde es más fácil registrar datos y realizar modelos cuantitativos. El resto de fenómenos, de flujos y de redes que atraviesan la ciudad, son probablemente más ricos y más complejos y escapan aún a una posible matematización. Más tarde discutiremos si esta complejidad imposible de matematizar está en la actualidad dejando lugar a una red de interacciones más previsible y más limitadas.

3. ¿Un nuevo mecanicismo?

Las redes neuronales, un sistema complejo que ya empieza a ser familiar, nos van a servir para ilustrar las diferencias entre lo que, al comienzo, definíamos como un mecanicismo cartesiano frente a uno leibniziano.

Supongamos que queremos diseñar un dispositivo que realice alguna tarea compleja, como diagnosticar una determinada enfermedad a partir de un conjunto de síntomas. Una posible estrategia consiste en diseñar lo que en inteligencia artificial se denomina *sistema experto*, es decir, un programa informático que trate de reproducir el razonamiento que haría, en nuestro ejemplo, un médico especialista en la citada enfermedad. El diseñador del sistema experto se entrevistaría con el médico y le pediría que describiera el modo como éste valora los síntomas y establece conexiones lógicas entre ellos. Después escribiría un programa, es decir, una sucesión de operaciones a realizar por el ordenador, que seguirían estrategias idénticas a las del médico.

¹⁰ J.M.R. Parrondo. *Paradojas y atascos de tráfico*. Investigación y ciencia, Septiembre 2002.

La introducción de las redes neuronales en inteligencia artificial cambió completamente este planteamiento. Una red neuronal, como ya hemos dicho, es un conjunto de neuronas interconectadas entre sí. La red recibe una entrada de información, los síntomas, y emite un diagnóstico. La estrategia para diseñarla, sin embargo, es completamente diferente a la del sistema experto. La red tiene un sinnúmero de parámetros y el diseñador los modifica mediante ejemplos. Enseña a la red un caso cuyo diagnóstico es conocido y, si la red se equivoca, el diseñador modifica los parámetros con una serie de reglas de aprendizaje para hacer que no vuelva a equivocarse en ese ejemplo determinado. Sorprendentemente, la red es capaz de generalizar, es decir, a partir de un cierto número de ejemplos, la red, entrenada sólo con esos ejemplos, es capaz de diagnosticar correctamente casos que nunca le han sido mostrados. Lo interesante es que el diseñador no sabe realmente cómo está operando la red. Ésta es demasiado compleja como para poder hacerse una idea de los flujos de información que la atraviesan y de cómo maneja esta información.

Aunque las redes neuronales se suelen programar también en ordenadores, la estrategia de diseño es completamente distinta a la de un sistema experto. En el caso de la red, lo único que hacemos es crear un sistema complejo (la red) y una evolución (las reglas de aprendizaje) que hagan que el sistema acabe en un estado en el que realiza la tarea deseada, aunque no tengamos ni idea de cómo lo hace.

La diferencia de estrategia podría compararse con la diferencia entre una economía planificada y una de libre mercado. En la economía planificada, el diseñador predice las demandas y las capacidades productivas, y cómo unas dependen de otras, y diseña un plan de producción en el que cada paso está lógicamente decidido. En la economía de mercado no hay nada planificado, tan sólo unas ciertas reglas de evolución y la esperanza de que sólo con ellas el sistema acabe satisfaciendo las demandas finales de un modo eficiente.

Igual que en la economía de mercado, en la red neuronal probablemente haya redundancias, trasiegos innecesarios de información, neuronas que no cumplen ninguna función, mientras que en el sistema experto cada línea de programa es vital. Este hecho es en muchas ocasiones positivo. La redundancia hace que el sistema sea más robusto a fallos y averías, como lo es nuestro cerebro, que soporta sin efectos demasiado apreciables la muerte diaria de miles de neuronas.

Pero lo más importante es que la planificación implica siempre una relación previa de funciones. Cada objeto tiene una función determinada o un número finito de funciones bien definidas. Quizá lo más característico de lo planificado es su finitud. Por el contrario, el sistema complejo al que se guía para que acabe realizando una cierta tarea —si bien dicha tarea está especificada de antemano y es obviamente finita— no “razona” siguiendo una secuencia finita de pasos con funciones determinadas dentro de una secuencia. La información fluye y se combina de modo imprevisible. Por eso las redes se han mostrado más eficaces que los sistemas expertos en problemas en donde es necesario utilizar la información de un modo global y en donde las respuestas son difusas, como por ejemplo en el reconocimiento de letras manuscritas.

La mecánica de Newton veía el universo como una máquina cercana al sistema experto. Máquina clásica, como el reloj o el motor de explosión. Máquina en donde cada elemento tiene una función determinada y el comportamiento colectivo se explica como una concatenación lógica de cada una de estas funciones.

Por otro lado, Leibnitz intuyó que los sistemas vivos constituían otro tipo de máquinas. Máquinas en las que cada parte era a su vez una máquina más pequeña, con piezas que eran a su vez máquinas, hasta el infinito. Es cierto que esta intuición puede interpretarse como una premonición de la organización jerárquica del cuerpo en órganos, células, organelos celulares y ácidos nucleicos y proteínas, y que en todos estos niveles cabe (aunque no sea cierta) una descripción en términos de máquinas clásicas. Pero la idea de Leibnitz va más allá de considerar al ser vivo una máquina más complicada. Consiste en asumir la infinitud de las funciones.

La física de los sistemas complejos recoge parte de esta idea y no sólo por la llamativa coincidencia entre la idea de Leibnitz y los fractales. Los sistemas complejos dejan claramente de ser máquinas newtonianas. Su comportamiento colectivo no es el esperado a partir de los comportamientos individuales. El comportamiento colectivo no se construye de la misma forma que las piezas de un reloj construyen el movimiento de las agujas. Las piezas tienen su papel preciso, mientras que los agentes de un sistema complejo pueden adquirir un papel fundamental en un cierto momento, por ser la semilla de una transición de fase, o ser “masa” prescindible en otro momento. No hay funciones sino sólo destellos que forman algo coherente pero de forma ciega. Y decir que no hay funciones preestablecidas es lo mismo que decir que hay infinitas funciones: hay un flujo de posibilidades de funciones, constante e impredecible, adaptándose permanentemente al entorno y al propio estado del sistema.

La física de los sistemas complejos es en este sentido liberación. Pone en la mano de la ciencia un nuevo tipo de sistema más rico, menos predecible, más holístico, y en el que tienen cabida los ecosistemas, el cerebro, nuestro sistema inmunológico, nuestro propio cuerpo. Y la ciudad.

En la ciudad, de hecho, se podría decir que convive el diseño de máquina newtoniana con la “realidad leibnitziana”. Las plazas, los parques, los servicios, las avenidas, se planifican, se diseñan asignando funciones determinadas, precisadas hasta un cierto punto. Sin embargo, cada elemento adquiere luego funciones para las que no fue diseñado. Colocado en la compleja red de flujos que es la ciudad, cada elemento es utilizado de una forma u otra atendiendo más a la red de flujos que al propio diseño. Precisamente la literatura sobre la ciudad fija la mirada en ese flujo, en esa imprevisibilidad. Se puede hacer un poema sobre la ciudad sólo si uno la mira como miraría a un bosque. Es decir, si uno mira esa infinitud que acaba creciendo, un poco a modo de tumor, sobre la relación finita de funciones de cada uno de los objetos y espacios que pueblan la ciudad.

Sin embargo, hay signos que indican que la ciudad comienza a despojarse de esta complejidad. En la ciudad norteamericana, el objeto cada vez escapa menos a su función y cada vez hay mayor previsibilidad. El homeless utiliza los edificios abandonados del downtown, los adolescentes se concentran en los vestíbulos del mall, que ya han sido diseñados para esa función. El mall americano no tiene ninguna vida propia, no hay sorpresas. El diseño prevé y arropa todas las necesidades.

4. Conclusiones: ¿por qué una ciencia de los sistemas complejos?

¿Y por qué ahora?, ¿por qué nace en la última década del siglo XX? Hay, como en todo movimiento de la historia de la ciencia, razones instrumentales. Una de las herramientas básicas de la ciencia de los sistemas complejos es la simulación y es ahora cuando empezamos a disponer de ordenadores suficientemente potentes y asequibles como para que se multipliquen las simulaciones de modelos que tratan de imitar el comportamiento de miles de agentes de bolsa comprando y vendiendo acciones, de una multitud huyendo de un estadio en llamas o de una bandada de pájaros migratorios. Tenemos también nuevas herramientas teóricas: los fractales, las leyes de potencias, la física estadística y un conocimiento más profundo de la estadística matemática y de la teoría de la probabilidad. Finalmente, y también ligado a la revolución informática, tenemos a nuestra disposición muchos más datos de sistemas complejos reales, puesto que se realizan y se registran medidas exhaustivas de las transacciones bursátiles, del tráfico urbano, de las migraciones; e incluso un nuevo sistema complejo en donde la información fluye entre millones de usuarios y cuyas acciones son también puntualmente registradas: Internet.

Tenemos pues los instrumentos, pero ¿para qué abordar este tipo de problemas? En primer lugar, por razones de estricta coherencia con los programas científicos que se vienen desarrollan-

do desde los últimos cuatro siglos. Al programa reduccionista “sólo” le queda por batir y someter a las leyes últimas de la física una gran parte de la biología y todo lo que hay “de ahí para arriba”: los fenómenos cognitivos, el comportamiento animal, las sociedades animales y humanas, la evolución del lenguaje... La ciencia de los sistemas complejos es la avanzadilla en el abordaje reduccionista y el primer intento de matematizar todo lo que uno se encuentre por delante. Además, en este proceso de matematización, el carácter metafórico de las matemáticas encandila más que nunca: es hermoso ver qué las mismas ecuaciones rigen el modo como aplaude el público después de oír una sinfonía de Brahms y el modo como las luciérnagas sincronizan sus destellos. Y este tipo de ejemplos suponen también el apogeo de esa especie de disparo centrífugo que lanzó Copérnico llevándose de la tierra al sol el centro del Universo y que continuó Darwin al quitarle a la especie humana cualquier tipo de singularidad biológica. Por razones históricas y metodológicas, el anti-anthropocentrismo ha sido siempre en ciencia un valor añadido.

Por otro lado, algunos sistemas complejos despiertan un interés obvio. Entender los mercados financieros tiene ventajas evidentes para los inversores y entender el sistema inmunológico o los sistemas complejos que aparecen en genómica y proteómica puede ayudarnos a combatir el sida y otras enfermedades.

Gran parte de estas razones, tanto de método como de utilidad, aparecen ahora, a finales del siglo XX y comienzos del XXI, gracias a la irrupción de un nuevo estilo de interacción social y económica: Internet, la bolsa y los mercados financieros, el consumo, el tráfico urbano. Todos ellos se configuran sobre redes de interacción pero con una nueva peculiaridad: las interacciones están más delimitadas, lo cual facilita su registro. Cuando interaccionamos con alguien en Internet, las formas de hacerlo son el intercambio de ficheros, el chat o la navegación. Aunque la información que fluye por Internet es muy variada, las acciones efectivas de cada usuario son limitadas. Más aún en un mercado financiero. En la interacción a través del consumo ocurre algo similar, puesto que sólo elijo lo que compro entre un repertorio amplio pero limitado de productos. Si conduzco en la ciudad, sólo decido el giro en cada esquina. En todas estas redes, el carácter limitado de las posibles acciones, junto con la tecnología informática, permite llevar un registro preciso de las acciones, del sujeto que las realiza y sobre quién o qué las realiza. Y este registro es el punto de partida para que se puedan aplicar las técnicas de la ciencia de los sistemas complejos.

Curiosamente, si se sigue esta línea argumental, la ciencia de los sistemas complejos y la visión de la naturaleza que propicia, tiene una doble cara. Por un lado saca a primer plano las máquinas infinitas de Leibnitz; nos dice: un ser vivo tiene una sensibilidad ilimitada, un comportamiento inagotable, una estabilidad que descansa sobre la incertidumbre. Y por otra necesita, para el estudio de sistemas sociales, que la interacción entre los individuos sea simple, una elección entre un repertorio limitado de posibles acciones, e ignora cualquier singularidad en esta interacción.

Lo verdaderamente peligroso es que la ciencia de los sistemas complejos, dándola por supuesta, ayude a desarrollar tecnologías que instauren esta interacción empobrecida entre las personas. Internet, redes comerciales automatizadas, o incluso sistemas telemáticos de toma de decisiones políticas, pueden convertir el espacio público alrededor del cual crecieron nuestras ciudades en una mera caricatura digital atravesada por flujos de ignorancia.