

Guido Caldarelli y Michele Catanzaro

# Redes

Una breve introducción



**Alianza** editorial  
El libro de bolsillo

Título original: *Networks. A Very Short Introduction.*  
*First Edition*  
Traducción de María Hernández Díaz

Publicada originalmente en inglés en 2012. Esta traducción se ha realizado por acuerdo con Oxford University Press

Diseño de colección: Estudio de Manuel Estrada con la colaboración de Roberto Turégano y Lynda Bozarth  
Diseño de cubierta: Manuel Estrada  
Ilustración de cubierta: Steve Vidler: *Japón, Tokio, Plano del metro de Tokio* (detalle)  
© Steve Vidler / Corbis  
Selección de imagen: Carlos Caranci Sáez

Reservados todos los derechos. El contenido de esta obra está protegido por la Ley, que establece penas de prisión y/o multas, además de las correspondientes indemnizaciones por daños y perjuicios, para quienes reprodujeren, plagiaran, distribuyeren o comunicaren públicamente, en todo o en parte, una obra literaria, artística o científica, o su transformación, interpretación o ejecución artística fijada en cualquier tipo de soporte o comunicada a través de cualquier medio, sin la preceptiva autorización.

Copyright © Guido Caldarelli and Michele Catanzaro, 2012

© de la traducción: María Hernández Díaz, 2014

© Alianza Editorial, S. A., Madrid, 2014

Calle Juan Ignacio Luca de Tena, 15;  
28027 Madrid; teléfono 91 393 88 88  
[www.alianzaeditorial.es](http://www.alianzaeditorial.es)

ISBN: 978-84-206-8617-2

Depósito legal: M. 2.967-2014

Printed in Spain

Si quiere recibir información periódica sobre las novedades de Alianza Editorial, envíe un correo electrónico a la dirección: [alianzaeditorial@anaya.es](mailto:alianzaeditorial@anaya.es)

# Índice

11	1. Mirar al mundo a través de las redes
19	2. Un enfoque fructífero
40	3. Un mundo de redes
66	4. Conectados y cercanos
83	5. Superconectores
99	6. Cómo «emergen» las redes
119	7. Más a fondo en las redes
138	8. Tormentas perfectas en las redes
160	9. El mundo entero es una red... ¿o no?
167	Otras lecturas
169	Índice de ilustraciones
171	Índice analítico



*Para mi familia*  
G. C.

*Para Anna*  
M. C.



# 1. Mirar al mundo a través de las redes

Las redes están presentes en la vida diaria de muchas personas. En un día normal comprobamos el correo electrónico, actualizamos los perfiles en las redes sociales, hablamos por el teléfono móvil, usamos el transporte público, viajamos en avión, transferimos dinero y trasladamos mercancías o iniciamos nuevas relaciones personales y profesionales... En todos estos casos estamos usando las redes y sus propiedades, aunque no seamos conscientes de ello.

Las redes aparecen también en importantes fenómenos globales. Las crisis financieras generan un efecto dominó en el tejido de conexiones entre bancos y empresas. Las pandemias –como la gripe aviar, la SARS o la gripe porcina– se difunden por la red de aeropuertos. El cambio climático puede alterar la red de relaciones entre especies en los ecosistemas. El terrorismo y la guerra tienen como objetivo la red de infraestructuras de los países. Los apago-

nes a gran escala se producen en las redes eléctricas. Los virus informáticos se difunden por Internet. Los gobiernos y las empresas pueden rastrear la identidad de las personas a través de las redes sociales y otras herramientas de comunicación digital. Por último, las distintas aplicaciones de la genética dependen del conocimiento de las redes de regulación génica del interior de la célula.

En todas estas situaciones encontramos un gran conjunto de elementos diversos (personas, empresas, aeropuertos, especies, centrales eléctricas, ordenadores, genes...) conectados por interacciones múltiples y desordenadas: es decir, todas tienen una estructura subyacente de red. A menudo esta red oculta es la clave para comprender dichas situaciones.

Un buen ejemplo es el desplome de la población de bacalao en el Atlántico noroeste durante los años ochenta. En esa época, la escasez de bacalao provocó una enorme crisis económica en la industria pesquera canadiense. Los agentes sociales interesados de Canadá exigieron más expediciones para cazar focas, afirmando que el control de estos depredadores del bacalao frenaría el colapso de los caladeros. Durante los años noventa se sacrificaron muchas focas, pero la población de bacalao no se recuperó. Mientras tanto, los ecologistas estudiaron las diferentes cadenas tróficas que conectaban al bacalao con las focas. Al final de la década dibujaron un mapa completo (Figura 1) en el que se podía comprobar que ambas especies estaban conectadas por muchas cadenas distintas. Este complejo esquema revela que cazar a los depredadores del bacalao no ayuda necesariamente a este pez. Por ejemplo, las focas cazan alrededor de 150

especies y algunas de ellas son depredadores del bacalao; si se reduce la población de focas, puede aumentar la presión de otros depredadores sobre el bacalao.

Los ecosistemas son redes complejas de especies: es fundamental tener en cuenta esta estructura de red subyacente si queremos comprenderlos y gestionarlos. También hay que tenerla presente para otros sistemas basados en la arquitectura de red. Así, por ejemplo, en el desarrollo de una enfermedad infecciosa como el sida tiene una influencia enorme el patrón de relaciones sexuales sin protección de una población. De igual forma, las crisis de liquidez dependen de las interconexiones en la red de intercambio de dinero entre bancos.

Todos estos ejemplos son casos de *fenómenos emergentes*. Se trata de unos comportamientos colectivos que no se pueden predecir observando cada uno de los elementos que forman el sistema. Los sistemas que presentan estos fenómenos se denominan *sistemas complejos*. Por ejemplo, una hormiga es un animal relativamente torpe, pero muchas hormigas juntas son capaces de realizar actividades tan complejas como construir grandes hormigueros o almacenar enormes cantidades de comida. En las sociedades humanas el orden social surge de la combinación de individuos autónomos, a menudo con intereses encontrados, que a pesar de todo terminan ejecutando tareas que nadie podría hacer por su cuenta. Igualmente, un organismo vivo surge de la interacción de sus partes; y la extraordinaria capacidad de recuperación de Internet tras los fallos, ataques y picos de tráfico es un comportamiento de la red en su conjunto y no el resultado de la acción de dispositivos individuales.



Las redes, con su énfasis en las interacciones, son la clave para comprender muchos de estos fenómenos. Imaginemos dos equipos de fútbol cuyos jugadores tengan habilidades parecidas, pero con resultados muy distintos: probablemente esta diferencia dependa de lo buenas o malas que sean las interacciones entre los jugadores en el campo. Por ejemplo, un jugador puede ser bueno en su equipo de la liga y malo en su selección nacional por las distintas posiciones que ocupa respecto a otros jugadores de esos dos equipos. El rendimiento de un equipo es un tipo de fenómeno emergente que depende no solo de la calidad de cada jugador, ni de la suma de sus cualidades individuales, sino de la red de interacciones entre ellos. Muchos fenómenos emergentes dependen de forma decisiva de la estructura de las redes subyacentes.

El estudio de las redes se centra en la estructura global de las interacciones de un sistema. Las propiedades particulares de cada elemento sencillamente se ignoran. En consecuencia, sistemas tan distintos como una red de ordenadores, un ecosistema o un grupo social se describen con la misma herramienta: por medio de un *grafo*, es decir, una simple arquitectura de nodos unidos por conexiones. Este planteamiento lo desarrolló originalmente Leonard Euler para las matemáticas y después se extendió a toda una serie de disciplinas como la sociología, que lo ha utilizado profusamente, y más recientemente a la física, ingeniería, informática, biología y muchas otras.

La representación de sistemas muy diferentes con la misma herramienta solo puede hacerse con un alto nivel

de abstracción. Lo que se pierde en la descripción específica de los detalles se gana en *universalidad*, es decir, pensar en sistemas muy diferentes como si fueran distintas materializaciones de la misma estructura teórica. Desde este punto de vista, la propagación de un virus informático puede ser similar a la difusión de la gripe; tumbar un router puede tener el mismo efecto que la extinción de una especie en un ecosistema, y el crecimiento de la World Wide Web (WWW) puede compararse con el desarrollo de la literatura científica.

Esta manera de ver las cosas lleva a conclusiones inesperadas. Por ejemplo, la representación de un sistema como un grafo nos permite identificar grandes estructuras que abarcan elementos aparentemente inconexos. En 2003, un fallo trivial en la red eléctrica suiza desencadenó un apagón a gran escala que afectó hasta a Sicilia, que se encuentra a mil kilómetros de distancia. Si nos centramos en la estructura de la red, descubrimos que elementos lejanos terminan estando estrechamente conectados mediante rutas de relaciones increíblemente cortas. La afirmación de que dos individuos social y geográficamente alejados –como pueden ser un habitante de la selva tropical o un directivo de la City londinense– están conectados por solo «seis grados de separación» no está desencaminada y puede explicarse por la estructura de red de las relaciones sociales.

El enfoque de las redes arroja luz sobre otro importante fenómeno: el hecho de que algunos sistemas que crecen sin control externo desarrollen espontáneamente un orden interno. Las células o los ecosistemas no están «diseñados», y sin embargo tienen un funcionamiento ro-

busto. Asimismo, los grupos y los procesos sociales surgen de una inmensa variedad de presiones y motivaciones distintas, y sin embargo toman formas claras y definidas. Internet y la WWW eclosionaron sin necesidad de una autoridad reguladora y fueron impulsados por numerosos agentes dispares: no obstante, su funcionamiento es por lo general coherente y eficaz.

Todos estos son *procesos autoorganizados*, es decir, fenómenos en los que el orden y la organización no son resultado de una intervención externa o de un plan global, sino de mecanismos o tendencias locales, repetidos a lo largo de miles de interacciones. Los modelos de red pueden describir de forma clara y natural cómo surge la autoorganización en muchos sistemas. Además, las redes nos ayudan a comprender mejor procesos dinámicos como la rápida propagación de un virus informático, las pandemias a gran escala, el hundimiento súbito de algunas infraestructuras o por qué surgen fobias sociales o modas musicales.

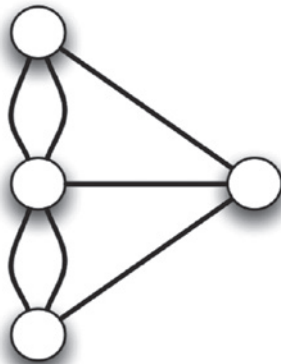
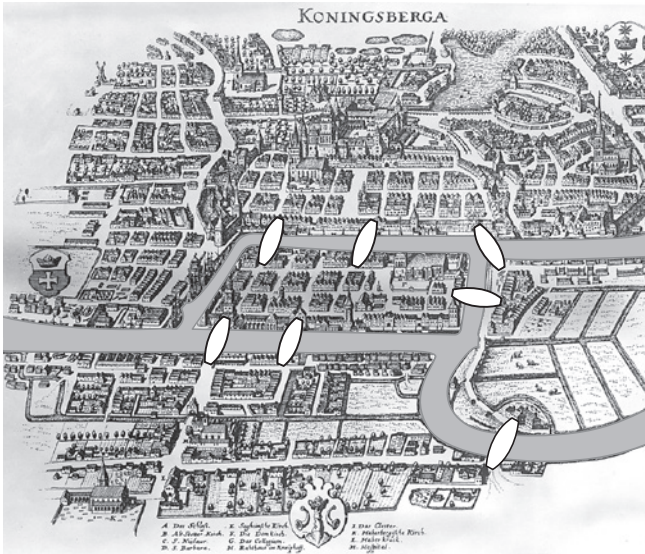
En el estudio de sistemas complejos, emergentes y autoorganizados (la moderna ciencia de la complejidad), las redes son cada vez más importantes como marco matemático universal, especialmente cuando hay grandes cantidades de datos que procesar. Esto es lo que ocurre cuando las personas acumulan consultas en los motores de búsqueda, actualizaciones en las redes sociales, pagos en línea, datos de tarjetas de crédito, transacciones financieras, posiciones GPS de los teléfonos móviles, etc. En todas estas situaciones las redes son instrumentos fundamentales para clasificar y organizar esos datos, y conectar entre sí individuos, productos, noticias, etc. De

forma parecida, la biología molecular usa cada vez más métodos informáticos que permiten encontrar un orden en la enorme cantidad de datos producidos por aquella disciplina. Lo mismo ocurre en muchos campos de la ciencia, la tecnología, la salud, el medio ambiente y la sociedad. En todos ellos las redes se han convertido en el paradigma para descubrir la arquitectura oculta de la complejidad.

## 2. Un enfoque fructífero

### Cruzar los puentes de Euler

La isla de Kneiphof se alza en el río Pregel, en la ciudad rusa de Kaliningrado. Hace tres siglos la ciudad pertenecía a Prusia, se llamaba Königsberg y por entonces siete puentes conectaban la isla con el resto de la ciudad (Figura 2, arriba). Entre sus habitantes era popular este acertijo: ¿Se podían atravesar los siete puentes sin cruzar ninguno de ellos dos veces? Nadie lo había conseguido nunca. Por otra parte, no había ninguna prueba formal sobre la viabilidad de ese recorrido. La solución la dio uno de los matemáticos más famosos de todos los tiempos. En 1736, Leonard Euler dibujó un mapa de Königsberg de una forma poco habitual. Representó la isla y las porciones de continente a su alrededor como puntos, y los puentes como líneas que conectaban los puntos entre sí (Figura 2, abajo).



2. Grabado de Königsberg (arriba), la actual Kaliningrado, mostrando el acertijo de sus puentes que Leonard Euler representó como un grafo (abajo).

Cuando se contempla el problema de esta forma, las cosas resultan más fáciles. Abstrayendo una red desde el paisaje de la ciudad, Euler demostró que el paseo era imposible. Su explicación se basa en la siguiente observación: para que un paseo así fuera factible, todos los puntos del recorrido deberían tener un número par de conexiones. Esto se debe a que cada vez que se entra en cualquier parte de la ciudad por un puente, hay que salir por otro distinto. En general, cada zona debe tener un número par de puentes, por ejemplo, 2, 4, 6. Únicamente los puntos iniciales y finales del paseo pueden tener un número impar de enlaces: en el punto de partida puede haber un único puente; y lo mismo sucede con el punto final. Desafortunadamente, en el gráfico de Königsberg todos los vértices tienen un número impar de enlaces. Por lo tanto, es imposible pasar solamente una vez por todos los puentes.

El mapa matemático simplificado de Königsberg es el primer ejemplo de un *grafo*. Los matemáticos llaman a los puntos y las líneas que lo forman *vértices* y *aristas*, respectivamente. Actualmente se atribuye a Euler el nacimiento de una rama de las matemáticas basada en el análisis de grafos. Su intuición puede considerarse el momento fundacional de la ciencia de las redes.

Después de él, muchos matemáticos estudiaron las propiedades formales de las redes, a la vez que muchos científicos las aplicaron a multitud de problemas: G. R. Kirchhoff, a los circuitos eléctricos en 1845; A. Cayley, a los isómeros de compuestos orgánicos en 1857; W. R. Hamilton, al concepto matemático conocido como «ciclo hamiltoniano» en 1858, etc.

Una aplicación famosa es el «problema del mapa de cuatro colores», que se planteó a mediados del siglo XIX. Por entonces, los geógrafos intentaban averiguar cuántos colores se necesitaban como mínimo para dibujar mapas en los que los países adyacentes tuvieran colores distintos. Se trataba de algo más que un problema teórico: teniendo en cuenta el gran número de países y la cantidad limitada de tintas disponibles en la industria de la impresión, era fundamental poder usar el menor número de colores posible. Empíricamente, tres colores no eran suficientes, mientras que cuatro parecía el número idóneo. La primera prueba de que la solución era efectivamente cuatro no se obtuvo hasta 1976. Se basa en la representación de un mapa como un grafo, en el que los nodos son los países y se dibuja una arista entre dos de ellos si tienen una frontera común.

## Niñas fugitivas, pueblos australianos y obreros de Chicago

En el otoño de 1932, catorce niñas se fugaron en un período de tan solo dos semanas de la Hudson School for Girls del Estado de Nueva York. Esta tasa de fugas era mucho mayor de lo habitual. Los directores del colegio decidieron estudiar las personalidades de las niñas para comprender el fenómeno. Como no se encontraron rasgos especiales en sus personalidades, el psiquiatra Jacob Moreno propuso una explicación completamente distinta. Planteó que esa elevada cifra se debía a la posición de las fugadas en la red social de las niñas. Moreno, junto con

Helen Jennings, trazó un mapa de los lazos sociales entre las estudiantes usando la *sociometría*, una técnica para identificar las relaciones entre individuos. Descubrieron que estos lazos eran el principal canal de comunicación por el que se difundía la idea de fugarse entre las niñas. La posición de un individuo en la red de amistades era crucial para copiar el comportamiento de las niñas fugadas.

Moreno fue uno de los primeros investigadores en aplicar la idea de red a la sociedad. Tras la intuición de Euler, su trabajo es un segundo paso fundamental en el establecimiento de la ciencia de las redes, con el que se inicia una de sus ramas más importantes: el análisis de las redes sociales.

Treinta años después, los antropólogos aplicaron un enfoque similar para estudiar las relaciones de parentesco en tribus como las de los arrente de Australia. En este caso dibujaron conexiones entre individuos emparentados. Los investigadores descubrieron que los diagramas resultantes respondían a elegantes estructuras matemáticas.

Este y otros resultados indicaban que bajo el desorden de la sociedad humana podían encontrarse estructuras sociales claras, e incluso leyes universales. Desde entonces, las ciencias sociales han utilizado profusamente el concepto de red para representar las estructuras sociales. Tras estos primeros estudios siguieron otros muchos: se centraron en los círculos de mujeres en el sur de Estados Unidos (de A. Davis, B. B. Gardner y M. R. Gardner en 1941), en grupos de obreros de las fábricas de Chicago (de E. Mayo en 1939), en la amistad entre colegiales (de A. Rapoport en 1961) o en las relaciones entre drogadictos en la ciudad de Colorado Springs (de Richard B. Rothenberg et al., en 1995), entre otros.

## Conexiones al azar

Un tercer momento importante en la fundación de la ciencia de las redes llegó con la publicación de varios artículos de los matemáticos Paul Erdős y Alfréd Rényi entre 1959 y 1961. Erdős, uno de los matemáticos más importantes del siglo XX, ha sido descrito como «un hombre al que solo le gustaban los números». No es del todo cierto: también le gustaban los grafos. Los dos teóricos estudiaron un modelo matemático que representaba un grafo en el que los vértices se conectaban entre sí de una forma completamente aleatoria. Este modelo, que después se denominaría *grafo aleatorio*, fue propuesto por primera vez en 1951, en un artículo, por los investigadores de matemáticas Ray Solomonoff y Anatol Rapoport.

El grafo aleatorio es un modelo muy simplificado y sus propiedades son muy distintas de las de las redes reales. Por ejemplo, el azar y la casualidad desempeñan un papel importante a la hora de conocer gente, pero la formación de redes de amistades está relacionada, sin duda, con muchos otros factores, como la clase social, los idiomas comunes y las afinidades. No obstante, el modelo de grafo aleatorio es muy importante porque cuantifica las propiedades de una red completamente aleatoria. Los grafos aleatorios pueden usarse como referencia, o *hipótesis nula*, para cualquier red real. Esto significa que un grafo aleatorio puede compararse con una red del mundo real para comprender qué papel ha desempeñado la casualidad para conformarla y hasta qué punto han intervenido otros criterios.

La receta más sencilla para construir un grafo aleatorio es la siguiente. Tomamos todos los pares de vértices posibles. Para cada par, lanzamos una moneda: si el resultado es cara, dibujamos un enlace; de lo contrario, pasamos al siguiente par, hasta que se terminen todos los pares (esto supone dibujar el enlace con una probabilidad  $p = \frac{1}{2}$ , pero podemos usar el valor que queramos para  $p$ ). Normalmente, el grafo no se crea ni se estudia manualmente. Los científicos utilizan programas informáticos y dibujan la red resultante en papel o en una pantalla de ordenador. Sin embargo, esto es difícil cuando la red es grande. Además, resulta complicado estudiar a simple vista una estructura tan enrevesada. Se obtiene más y mejor información estudiando el grafo como un objeto abstracto, por medio de herramientas matemáticas.

Los ordenadores también ayudan: la simulación nos permite construir, dentro de la «mente» del ordenador, una representación fidedigna de la red, y después medirla como si fuera un objeto real. Si queremos comparar el modelo abstracto con una red del mundo real, solo hay que comparar las mediciones en ambos casos.

Desde su introducción en los años sesenta, el modelo de grafo aleatorio se ha convertido en uno de los modelos matemáticos de mayor éxito, a pesar de su débil conexión con la realidad. Actualmente es una referencia para la comparación de todas las redes, puesto que cualquier desviación de este modelo indica la presencia de algún tipo de estructura, orden, regularidad y no aleatoriedad en muchas redes del mundo real.