

GEORGINA HERNÁNDEZ MONTES

RAI-UNAM

La Dra. Georgina Hernández Montes es Química Farmacobióloga egresada de la Facultad de Química de la UNAM. Actualmente es parte de la Red de Apoyo a la Investigación (RAI) de la UNAM y se ha especializado en el área de bioinformática. Esta publicación fue revisada por el comité editorial de la Academia de Ciencias de Morelos.

Si miramos con atención a nuestro alrededor, podemos darnos cuenta de que estamos rodeados de sistemas que son extremadamente complejos. Por ejemplo, la sociedad está compuesta por millones de individuos que necesitan cooperar dentro de un sistema económico para que un país funcione. Otro ejemplo podría ser la infraestructura de telecomunicaciones que está compuesta por millones de teléfonos, computadoras y satélites. A nivel biológico también estamos compuestos de sistemas complejos y para que podamos conocerlo e interpretarlo, es necesario el funcionamiento de millones de neuronas en nuestro cerebro, que a su vez están conectadas a los diferentes órganos o tejidos. A nivel molecular nuestra existencia está determinada por la interacción de miles de genes, proteínas y metabolitos dentro de nuestras células. Debido al papel tan importante que juegan estos sistemas complejos en nuestra vida diaria, en la ciencia y en la economía, su comprensión, descripción matemática y eventual control es uno de los principales retos tanto intelectuales como científicos de nuestra época.

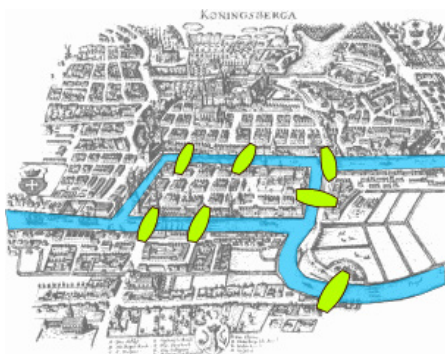


FIGURA 1. ILUSTRACIÓN de los puentes de Königsberg. Figura tomada de [https://es.wikipedia.org/wiki/Problema\\_de\\_los\\_puentes\\_de\\_K%C3%B6nigsberg](https://es.wikipedia.org/wiki/Problema_de_los_puentes_de_K%C3%B6nigsberg)

Los sistemas complejos tienen tres características que los definen: 1) el comportamiento emergente, 2) la emisión y procesamiento de la información y 3) la adaptación al entorno.

Todos los sistemas complejos poseen un gran número de elementos individuales interrelacionados. Cada uno de estos elementos juega un doble papel dentro de un sistema, ya que están determinados por los demás elementos y a su vez determinan a los demás. Matemáticamente se dice que estas interrelaciones están marcadas por un principio de carácter no lineal, lo que indica que esta interacción produce un estado constante de inestabilidad. Sin embargo, a partir de estas interacciones internas emerge un comportamiento colectivo y auto organizado. Un ejemplo que puede ser muy ilustrativo de estas tres características es el de una colonia de hormigas. Este sistema está compuesto por una gran cantidad de individuos interrelacionados que se comunican a partir de señales químicas que son las hormonas. Si alteramos el sistema arrojando agua al hormiguero, observaremos que las hormigas se comportan de manera desordenada, pero después de un tiempo nos daremos cuenta de que empezaron a actuar de manera colectiva y organizada para responder a la perturbación. Este comportamiento no solo permite dar solución a un problema como el anterior, sino que también les permite llevar a cabo las tareas de recolección de alimentos, la reproducción o la reconstrucción de un hormiguero. La propiedad emergente puede representarse en el hecho de que una hormiga reina si está sola puede vivir 3 días, mientras que en una comunidad puede vivir hasta 15 años.

Y como este ejemplo podemos encontrar muchos en nuestro entorno, pero como mencionamos previamente uno de los intereses científicos y económicos es comprender, predecir y controlar estos sistemas. Para ello se ha desarrollado lo que se conoce como la ciencia de las redes, donde se considera que todos los sistemas complejos están compuestos de una red que codifica la interacción entre cada uno de sus componentes, por ejemplo: a) las redes celulares que son un prerequisite para la vida y están compuestas de la interacción entre proteínas, genes y metabolitos dentro del compartimento celular, b) las redes neurales que pueden darnos las claves de nuestro entendimiento acerca de cómo funciona nuestro cerebro y nuestra

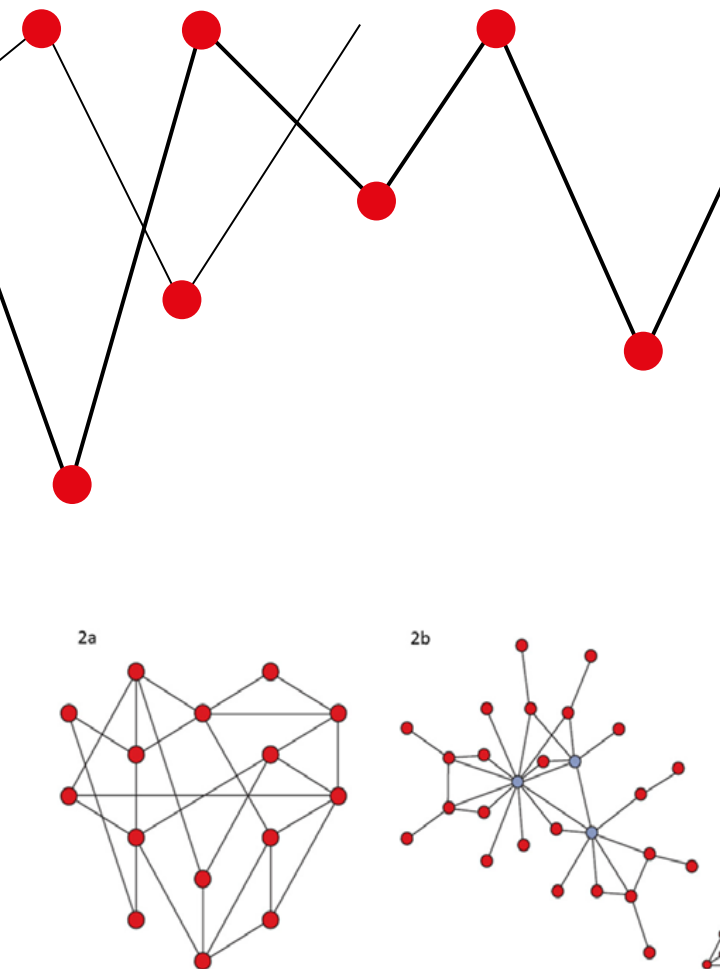


FIGURA 2. REPRESENTACIÓN de la topología de las redes. a) redes aleatorias, b) redes de libre escala y c) redes jerárquicas. Figura tomada de <https://www.nature.com/articles/nrg1272>

conciencia están determinadas por las interacciones entre las neuronas, c) las redes sociales que a la fecha son la suma de nuestras interacciones profesionales, familiares y de amistad pueden determinar cómo se distribuye la información, los patrones de conducta y la distribución de los recursos, d) las redes de comunicación que son el corazón de los sistemas de comunicación modernos están determinadas por la interacción de los dispositivos a través de la red de internet y e) las redes comerciales que nos permiten obtener productos y servicios y que son las responsables del bienestar del que gozan la sociedad actualmente están determinadas por las cadenas de distribución y transporte de los mismos.

## TEORÍA DE REDES

Como ya mencionamos, las redes tienen un impacto muy importante en nuestra vida, pero aún no hemos dicho cómo llegamos a esa conclusión. A partir de la idea de que un sistema complejo pue-

de reducirse a una serie de componentes abstractos unidos por un conjunto de conexiones se desarrolló lo que se conoce como la teoría de grafos. El primer trabajo en este campo se le atribuye al matemático del siglo XVIII, Leonhard Euler, quien en 1736 la utilizó para resolver el problema de los Siete Puentes de Königsberg que consistía en demostrar que no se pueden visitar todas las islas de la ciudad de Prusia, sin cruzar al menos uno de los siete puentes de la ciudad dos veces, Euler construyó un mapa abstracto de la ciudad, en el que las islas están representadas por nodos, y los puentes: por bordes (Figura 1). Al hacerlo, Euler representó un problema realista y todas sus complejidades, con un modelo matemático abstracto y limpio, que le permitió centrarse estrictamente en la esencia estructural del problema. Sin embargo, no es hasta doscientos años después, que en el siglo XX surge como una teoría matemática formal.

Esta columna se prepara y edita semana con semana, en el ámbito social y económico de Morelos. Desde la Academia de Ciencias e Innovación, Ciencia y Tecnología dentro del ecosistema de

# LA CIENCIA DE LAS REDES Y SU CONEXIÓN CON LO QUE NOS RODEA

## IMPACTO EN SALUD

Seguramente, estimado lector, usted recordará el brote de influenza H1N1 en el 2009, por su impacto mediático y económico. Sin embargo, también fue excepcional porque fue la primera pandemia cuyo curso y tiempo evolucionaron con precisión de acuerdo con las predicciones matemáticas que se hicieron meses antes de que la pandemia alcanzara su punto máximo. Esto fue posible gracias a los avances fundamentales en la comprensión del papel de las redes de transporte en la propagación de virus. Antes del año 2000, el modelo epidémico estaba basado en un modelo de compartimento, suponiendo que todos los individuos que compartían un mismo espacio socio-físico podían infectar a todos los demás. La aparición de los modelos basados en las redes brindó un cambio fundamental a la comprensión del fenómeno, ofreciendo un nuevo ni-

vel de previsibilidad. Actualmente, la predicción de epidemias es una de las aplicaciones más activas de la ciencia de redes, que se utiliza para prever la propagación de la gripe o para contener el ébola e incluso ha servido también para predecir la propagación de virus digitales y sociales.

Otra de las aportaciones importantes ha sido en la medicina. Como ya se ha mencionado en columnas previas, el proyecto del genoma humano que fue completado en el año 2001 ofreció la primera lista de todos los genes humanos. Sin embargo, para comprender completamente cómo funcionan nuestras células y el origen de las enfermedades, esta lista no es suficiente. También necesitamos un mapa preciso de cómo todos los componentes celulares interactúan entre sí. Para ello, la aplicación de los modelos basados en redes ha sido fundamental. Se ha observado que las redes biológicas siguen el modelo de libre escala donde hay nodos altamente conectados que han permiti-

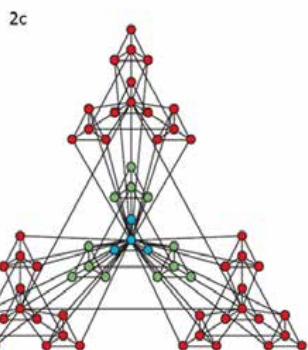
do encontrar blancos terapéuticos es decir proteínas o genes que al perturbarlos pueden tener un mayor impacto desde el punto de vista farmacológicos. También han permitido visualizar las enfermedades de los pacientes como una red de interacciones entre diferentes factores como las evidencias clínicas (Figura 3).

## IMPACTO SOCIAL

Una de las áreas que también se ha beneficiado del estudio de redes es la de manejo de organizaciones. La visión tradicional indica que la gestión de una organización recae sobre la línea de mando que inicia en la gerencia y se permea hasta los puestos más bajos, sin embargo, cada vez es más evidente que la red informal, es decir quién realmente se comunica con quién, juega el papel más importante en el éxito de una organización. La aplicación de modelos basados en redes permite exponer la posible falta de interacciones entre las unidades clave, ayudar a identificar a las personas que juegan un papel importante en la unión de diferentes departamentos y productos, y ayudar a la alta gerencia a resolver diversos problemas organizacionales. Es por ello que actualmente existen numerosas empresas que ofrecen herramientas y metodologías para trazar la verdadera estructura de una organización y empresas tales como IBM, que han agregado estas herramientas a sus negocios.

Otro aspecto que se ha beneficiado de este tipo de modelos es el combate a la delincuencia organizada. El poder trazar las redes de distribución y financieras de las organizaciones delictivas, nos permite entender sus actividades de una manera más fácil, para así poder bloquearlas. Si bien la mayoría de esta información, por su nivel de seguridad son confidenciales, hay algunos casos publicados, como el uso de redes sociales para capturar a Saddam Hussein.

Finalmente, donde mayor impacto ha tenido esta disciplina es en el ambiente científico. Tan solo en 2019 se han publicado 45,500 artículos acerca de redes y se han publicado decenas de libros e incluso, las revistas más prestigiosas han dedicado decenas de portadas y números especiales al tema. Es por ello que regularmente en esta columna, reiteramos la importancia de apoyar la ciencia en todos sus aspectos tanto básicos como aplicados. En este caso, los modelos matemáticos que hace 50 años parecían no tener un mayor impacto en la vida diaria, hoy sabemos que no podríamos entender ni controlar o predecir el comportamiento de gran parte de los sistemas que nos rodean si carecemos de ese conocimiento.



En la actualidad, existen tres modelos matemáticos que describen las redes que son ampliamente utilizadas para modelar sistemas: a) Redes aleatorias. Este modelo tiene la premisa de que un nodo cualquiera puede conectarse a otro nodo con la misma probabilidad. Y que todos los nodos tienen el mismo número de enlaces (Figura 2a), b) Redes de libre escala. Son las redes que se caracterizan por tener nodos altamente conectados y nodos con pocas conexiones (Figura 2b) y, c) Redes jerárquicas las cuales implican que nodos escasamente conectados son parte de áreas altamente agrupadas con comunicación entre las diferentes vecindades, altamente agrupadas siendo mantenidas por algunos ejes. Este modelo tiene una topología de red de libre escala, pero con modularidad (Figura 2c). El modelo más común en los sistemas estudiados es la red de libre escala, el cual nos ha permitido hacer grandes descubrimientos y aportaciones tanto a nivel científico como a nivel social.

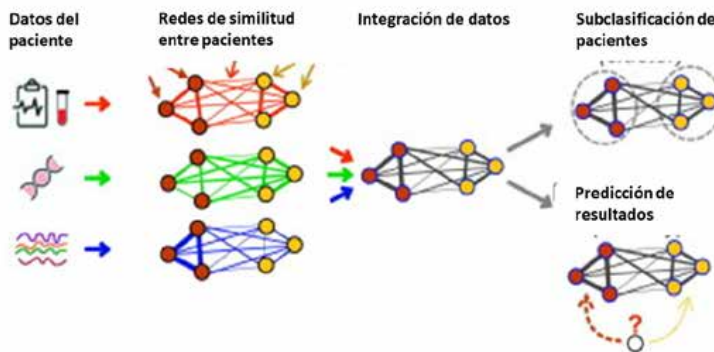


FIGURA 3. ILUSTRACIÓN de la aplicación de redes a la medicina. Figura modificada de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022283618305321>

conjunto con investigadores morelenses convencidos del valor del conocimiento científico para el desarrollo ciencias de Morelos externamos nuestra preocupación por el vacío que genera la extinción de la Secretaría de Innovación estatal que se debilita sin la participación del Gobierno del Estado.

### Ligas de interés

<http://barabasi.com/>  
<http://networksciencebook.com/>