





# Las rutas de la complejidad

LAS RUTAS DE LA COMPLEJIDAD

Publicación de Ediciones Instituto de Sistemas Complejos de Valparaíso.  
Instituto de Sistemas Complejos de Valparaíso, 2014.

Registro de Propiedad Intelectual N°  
I.S.B.N: 978-956-9478-00-0

Con la colaboración de Ediciones Universitarias de Valparaíso

Cesión de derechos

Se han cedido para esta edición los derechos de autor de los siguientes textos:

- © César Hidalgo. *El valor de los enlaces: Redes y la evolución de las organizaciones, traducción del texto The value in the links: networks and the evolution of organizations, de CA Hidalgo Chapter 32 for Sage Handbook on Management and Complexity (2011) edited by P. Allen, S. Maguire and B. McKelvey*
- © Juan A. Asenjo, Barbara A. Andrews: *Complejidad, redes dinámicas, metabolómica y evolución dirigida.*
- © Juan Camilo Cárdenas: *De la Economía Convencional a la Complejidad en el Comportamiento Individual y Agregado en los Dilemas Sociales.*
- © Juan Pablo Cárdenas: *Complejidad: Una aproximación desde la teoría de redes.*
- © Miguel Ángel Fuentes: *Sistemas complejos y emergencia.*
- © Pablo Marquet: *Complejidad y evolución más allá de Darwin & Wallace.*
- © Ricardo Espinoza: *Hegel y la filosofía de la complejidad: el método por excelencia.*
- © Instituto de Sistemas Complejos de Valparaíso: *Redes complejas: Un caso de estudio sobre la colaboración científica.*

Editores: Edmundo Bustos Azócar, Pablo Marquet Iturriaga y Adrián Palacios Vargas

Traducciones:

Hugo González Vidal. Grupo Innovación y redes, Instituto de Sistemas Complejos de Valparaíso.  
Fabiola Cabrera Valencia, investigadora asociada, Instituto de Sistemas Complejos Valparaíso.  
Edmundo Bustos Azócar, Director Ejecutivo, Instituto de Sistemas Complejos Valparaíso.

Diseño gráfico: Gonzalo Catalán Valencia.

Supervisión de textos: Rubén Dalmazzo Peillard.

Impresión: Litografía Garín S.A.

Tirada de 1.200 ejemplares

Impreso en Chile / Printed in Chile

# Las rutas de la complejidad

Edmundo Bustos A.  
Pablo A. Marquet  
Adrián G. Palacios  
Editores



INSTITUTO DE  
**Sistemas Complejos**  
DE VALPARAÍSO



Symnetics

CATENARIA  
Gestión del Conocimiento

HUILO - HUILO  
LA REDUCCIÓN ENERGÉTICA DEL TONELAJE



MELLA Y SALAS  
TECNOLOGÍA Y SERVICIOS

# Indice

## PRESENTACIÓN

11 Iván Valenzuela

## INTRODUCCIÓN

17 Pablo A. Marquet, Adrián G. Palacios

## ARTÍCULOS

25 El valor de los enlaces:  
Redes y la evolución de las organizaciones  
César Hidalgo

49 Complejidad.  
Una aproximación desde la teoría de redes  
Juan Pablo Cárdenas

87 Sistemas complejos y emergencia  
Miguel Ángel Fuentes

111 De la economía convencional a la complejidad en el  
comportamiento individual y agregado en los dilemas  
sociales  
Juan Camilo Cárdenas

- 143 **Complejidad y evolución  
más allá de Darwin y Wallace**  
Pablo A. Marquet
- 153 **Complejidad, redes dinámicas,  
metabólica y evolución dirigida**  
Juan Asenjo, Barbara Andrews
- 177 **Redes complejas: un caso de estudio  
sobre la colaboración científica.**  
Juan Pablo Cárdenas, Gastón Olivares,  
Fabiola Cabrera, Rodrigo Alfaro,  
Daniel Goya, Horacio Samaniego,  
Jorge Gibert, Adrián G. Palacios.
- 211 **Hegel y la filosofía de la complejidad:  
el método por excelencia**  
Ricardo Espinoza Lolas

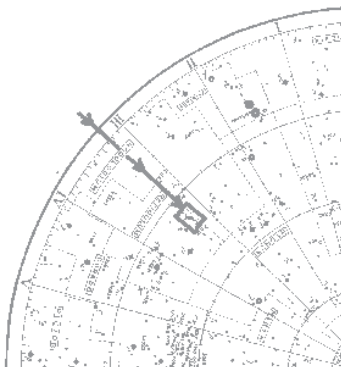


## Presentación

El Instituto de Sistemas Complejos de Valparaíso es una corporación privada sin fines de lucro, fundado el año 2003 por científicos, académicos y empresarios, cuyo propósito ha sido desarrollar reflexión en torno a las ciencias de la complejidad con el objetivo de proporcionar nuevos paradigmas para abordar, con una mirada transformadora, las nuevas interrogantes y desafíos sociales, ambientales, económicos y culturales de nuestro país.

Durante más de una década, hemos puesto especial atención a la formación de capital humano avanzado a través de Escuelas de Verano e Invierno, que han desarrollado contenidos en investigación sobre sistemas complejos, neurociencia computacional, complejidad y diversidad biológica y social, matemáticas discretas y biogeografía, entre otras disciplinas. Desde el año de nuestra fundación hemos colaborado en la formación de más de mil doscientos alumnos de posgrado de diversas nacionalidades, con la participación de más de ciento ochenta académicos provenientes de Chile, América Latina, Europa y Estados Unidos.

Durante los últimos diez años, el Instituto se propuso mirar nuestro entorno de múltiples maneras y perspectivas, para hacernos cargo de preguntas y problemas fundamentales. Articulamos la discusión desde una diversidad de disciplinas que nos permitieran entender mejor lo que ocurre en nuestras sociedades, tan cambiantes, dinámicas e interdependientes. Hoy creemos que, además de ello, podemos incidir de una forma más activa, proponiéndonos ser una plataforma para un trabajo común entre la universidad y la empresa, vínculo que a pesar de ser reconocido como fundamental para la innovación y generación de mayor valor, es muy débil, al punto de visualizarse recíprocamente



como entidades autónomas. Un rol articulador del Instituto de Sistemas Complejos de Valparaíso, junto al de muchas otras instituciones, puede ser muy importante para hacer efectivo este diálogo.

Esta plataforma surge de la necesidad, constatada por el Instituto, de generar vínculos entre la comunidad científica y la empresa, contribuyendo a estimular la adecuación de las políticas públicas para este objetivo. Esto no es una tarea fácil porque en Chile, esta triple hélice, de universidad, empresa y gobierno, se ha desarrollado históricamente como esferas casi autónomas, primando la desconfianza y hasta la descalificación entre ellas.

Creemos que es muy importante que tal comunicación exista, y frente a los desafíos que enfrenta actualmente el país es aún más necesario. La comunidad científica chilena ha generado algunas líneas de trabajo de un buen estándar internacional, que muestra que con prioridades y focos claros, se puede hacer buena ciencia y con aportes relevantes para el país. Y también se ha avanzado, aunque menos de lo necesario y posible, en el establecimiento de vínculos más estrechos y de largo plazo, entre la comunidad científica y el mundo de la empresa, sobre todo en las generaciones más jóvenes.

Desde el Instituto podemos hacer convocatorias a académicos, investigadores, empresarios, organismos no gubernamentales y autoridades públicas, para discutir problemas que atañen a la región, a la empresa y a la comunidad, con el fin de dilucidar ejes estratégicos para el crecimiento, cuellos de botella, búsqueda de nuevas soluciones tecnológicas, aprovechando las redes de conocimiento que se han establecido, tanto al interior del país como internacionalmente.

En esa perspectiva, consideramos que una institución dedicada a las ciencias debe estar en contacto y relación permanente con la comunidad que la alberga y acoge. Por esta razón, son constantes las actividades de extensión, a través de ciclos de charlas abiertas al público, conferencias y actividades relevantes en la discusión local. Solo en los dos últimos años han asistido cerca de dos mil personas a nuestros ciclos con Premios Nacionales, o a las ponencias de investigación regional avanzada. Nuestra reciente participación en el *Festival Puerto de Ideas de Valparaíso*, a cargo de la sección de ciencias, congregó a cuatrocientas personas que escucharon exposiciones de cinco científicos jóvenes de Chile, que desarrollan investigación de vanguardia en el ámbito de la astronomía, las neurociencias, la ecología, la historia y la biotecnología.

Es en esta misma línea que presentamos nuestro libro *Las rutas de la complejidad*, que recoge aportes de connotados científicos nacionales y latinoamericanos. Las rutas de la complejidad postula que en la base de los estudios sobre la complejidad está la interdisciplina, y el reconocimiento de que existen propiedades fundamentales de los sistemas complejos, ya sean estos físicos, biológicos o sociales. Y, en tal contexto, la publicación busca —como lo indica la Introducción al mismo— contribuir a crear un espacio interdisciplinario que nos permita entender el mundo y su complejidad e invitar a la comunidad a adentrarse en sus rutas. Estamos muy seguros de que este segundo libro del Instituto de Sistemas Complejos de Valparaíso tendrá el mismo impacto de nuestra primera publicación, *La Ciencia del Ser*, en homenaje a Francisco Varela, lanzado durante el año 2011.

El nacimiento del presente libro es el resultado de la colaboración y el esfuerzo de muchas personas e instituciones. En este marco queremos agradecer sinceramente, y en primer lugar, a los autores de cada uno de sus capítulos. De igual manera, a muchos amigos del Instituto que prestaron dedicación y compromiso con esta iniciativa. Entre ellos a Hugo González Vidal por su colaboración en la traducción de artículos, a Fabiola Cabrera y Graciela Moguillansky, por la revisión de capítulos; a sus editores, Adrián Palacios, Pablo Marquet y Edmundo Bustos. A Patricio Jadue, por su apoyo constante. A Gonzalo Catalán, por el diseño y diagramación, y a Rubén Dalmazzo por la corrección de estilo. Al equipo de nuestro Instituto, Adita González, Marta Quevedo y Gastón Olivares, por su colaboración permanente.

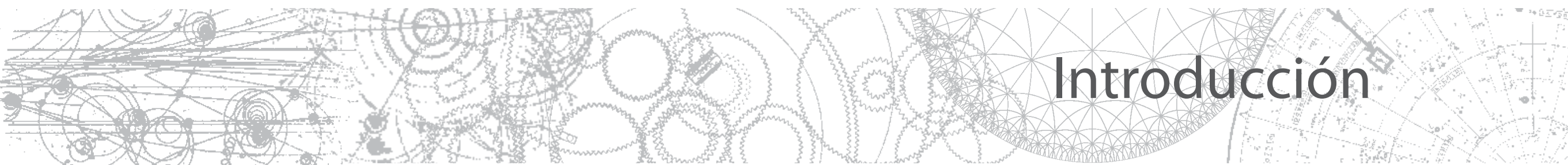
Por último, queremos agradecer por su confianza en esta iniciativa a quienes auspiciaron *Las rutas de la complejidad*: Corporación Chilena del Cobre, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Fundación Hui-lo-Huilo, Catenaria, Symnetics, Mellafe y Salas, proyecto minero Domingo de Andes Iron, El otro lado y Ediciones Universitarias de Valparaíso de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.

Iván Valenzuela R.

Presidente Directorio

Instituto de Sistemas Complejos de Valparaíso

Valparaíso, julio de 2014.



# Introducción

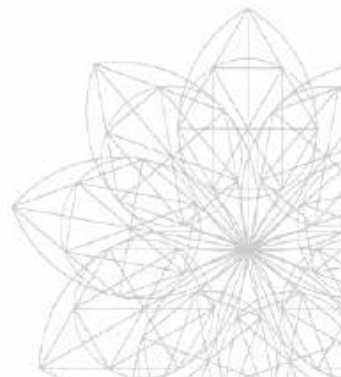


# Introducción

Pablo A. Marquet<sup>1</sup> & Adrián G. Palacios<sup>2</sup>

Todo proceso biológico, físico, ecológico y social involucra conductas no previstas que pueden dar cuenta de fenómenos emergentes. Por mucho tiempo estos procesos han escapado al entendimiento formal clásico y solo recientemente, gracias a colaboraciones interdisciplinarias, se han logrado desentrañar algunos de los principios comunes u universales a estos procesos. Esto último ha dado origen a la ciencia de la complejidad. Tomemos, un ejemplo conocido de todos, la congestión vehicular. Para muchos conductores que circulan a diario por un mismo trayecto no les resulta extraño encontrarse de vez en cuando en medio de una congestión vehicular densa y que escapa a toda explicación. De a poco la circulación se hace más fluida y desaparece sin que el conductor logre entender la causa que generó la congestión. ¿Cómo puede esto suceder? Si definimos cada vehículo como un agente que circula a una velocidad dada y que a la vez es regulada por la conducta de otros agentes, entonces la combinación de aceleraciones y detenciones en el tiempo darían cuenta de la dinámica, a nivel local y global, de la red de vehículos. En esta dinámica la conducta individual se ve afectada por la de los vecinos dando cuenta de la importancia de la retroalimentación para la toma de decisiones individuales. En el escenario sistemas complejos,

1. Departamento de Ecología, Facultad de Ciencias Biológicas, Pontificia Universidad Católica de Chile, Casilla 114-D, Santiago, Chile.  
Instituto de Ecología y Biodiversidad, Facultad de Ciencias Universidad de Chile, Casilla 653, Santiago, Chile.  
The Santa Fe Institute, Santa Fe, New Mexico 87501, USA.  
Instituto de Sistemas Complejos de Valparaíso, Valparaíso, Chile.
2. Instituto de Sistemas Complejos de Valparaíso, Valparaíso, Chile.  
Centro Interdisciplinario de Neurociencia de Valparaíso, Universidad de Valparaíso, 2360102, Valparaíso, Chile.



la congestión vehicular resulta de una red de interacciones entre agentes y cuya dinámica o evolución temporal depende de condiciones iniciales dando inicio a múltiples escenarios o vías de salida lo cual puede resultar en fenómenos emergentes no contemplados.

La ciencia de la complejidad intenta entender una clase de fenómenos que se caracterizan, como en el ejemplo anterior, por no poseer un control centralizado, donde la estructura y la organización emergen como consecuencia de lo colectivo y en un dominio donde lo que se intercambia es materia, energía o información. La descripción de estos fenómenos ha seguido históricamente distintas rutas, las que denominamos rutas de la complejidad, algunas de las cuales se reúnen en este libro. Entre éstas tenemos, por ejemplo, la concepción de un sistema complejo como una red de interacciones. Esta aproximación, que hace uso de lo que se denomina teoría de redes (o, más formalmente, teoría de grafos) (véase capítulos de César Hidalgo y Juan Pablo Cárdenas para una introducción), ha tenido mucho auge en las últimas décadas y sus aplicaciones a sistemas biológicos ha sido de gran valor para entender la dinámica de los sistemas biológicos y en particular las redes de interacción génica de organismos como levaduras y bacterias. Tal como señalan Juan Asenjo y Barbara Andrews, en su capítulo, estos desarrollos que intentan “domesticar la complejidad de lo vivo” son esenciales para entender la condición normal y también la patológica de los seres vivos y abre importantes puertas al desarrollo de nuevas tecnologías. De manera similar, las empresas e instituciones pueden ser entendidas como redes y, como nos señala César Hidalgo en su capítulo, *“La ciencia de las redes, como una combinación de métodos de detección y técnicas de análisis, puede ayudar a las organizaciones a ser más conscientes de sí mismas. Las que comprenden sus propias redes, es probable que tengan una mejor oportunidad de adaptarse, en cuanto a que el conocimiento respecto de su configuración actual puede ayudar a la formulación, evaluación y el rendimiento de sus equipos de trabajo.”* Actualmente existe una explosiva aplicación de esta teoría para entender la interacción entre seres humanos en encuentros cara-a-cara o a través de internet o teléfonos celulares. Un ejemplo particular de éstas aplicaciones es presentado por Juan Pablo Cárdenas y colaboradores para el caso de las redes de colaboración científica en la región de Valparaíso. En ésta investigación, los autores ubicados en las instituciones de investigación de la región, corresponden a los nodos, los que son unidos entre sí por los trabajos científicos que producen en colaboración (que corresponderían a

los enlaces o links). El análisis de estas redes de colaboración en el tiempo muestra que a partir del año 2000 se inicia un cambio en la dinámica de la colaboración científica de la región, causado por la llegada de nuevos nodos (autores), por una mayor colaboración entre estos nodos y nodos ubicados en el extranjero y, por una mayor generación de links (trabajos científicos) entre ellos. Esta información es fundamental para la evaluación y formulación de políticas científicas que permitan potenciar el desarrollo de la actividad científica regional.

Creemos no equivocarnos cuando señalamos que la complejidad es una parte constitutiva de aquello que caracteriza nuestra humanidad. Somos la complejidad encarnada, la vivimos día a día. Estudiar la complejidad es estudiar el fenómeno humano en su interacción con el sistema natural del que es parte constitutiva. Los denominados sistemas socio-ecológicos representan esta complejidad y constituyen una de las rutas de la complejidad que abarcamos en este libro a través del capítulo de Juan Camilo Cárdenas, donde se profundiza en el análisis de las decisiones humanas y cómo estas determinan y, a la vez, son determinadas por las interacciones entre lo social y los contextos ecológicos en que están inmersas. En este contexto es de especial interés observar cómo los grupos humanos usan recursos que son comunes y cuya explotación, si se rigiera por la maximización del retorno individual, podría llevar a la denominada tragedia de los comunes y por lo tanto a la sobreexplotación no sustentable de éstos. Tal como señala Juan Camilo Cárdenas, existe amplia evidencia teórica y experimental que señala que las decisiones que toman los grupos humanos no persiguen, por lo general, la maximización del beneficio propio, sino que existe un sentido de comunidad y de colaboración que desafía el paradigma económico dominante. Definitivamente, los sistemas socio-ecológicos son sistemas adaptativos complejos, donde sus componentes cambian continuamente en función de contextos específicos y representan una frontera en el análisis de la complejidad. Esto ocurre especialmente en el contexto de los desafíos ambientales que actualmente enfrentamos como civilización.

Los sistemas adaptativos complejos se caracterizan por una continua y dinámica interacción entre sus componentes y los contextos donde estas interacciones toman lugar. Pablo Marquet, toma esta idea en un contexto evolutivo y analiza cómo los sistemas complejos no sólo modifican su contexto ambiental sino que además estas modificaciones se vuelven sobre ellos a la manera de fuerzas evolutivas que los moldean. Este continuo

diálogo de co-determinación entre los sistemas complejos y su ambiente se conoce como 'construcción de nicho' y representa la irrupción de una nueva manera de pensar la complejidad y, en particular, la evolución desde una perspectiva circular. Finalmente, señala Marquet, el componente que es necesario articular en una teoría general de la evolución de los sistemas complejos en biología y en particular la emergencia de la selección natural, es el de auto-organización o aquello que surge como consecuencia de la dinámica interna de interacciones que caracterizan al sistema y que son capaces de generar orden sin necesidad de apelar al efecto directo del ambiente en el que el sistema está inmerso.

Todo lo que nos rodea es nuestra causa y consecuencia, todo puede ser interpretado a través de una reflexión sobre el devenir histórico, sobre un flujo de circunstancias que en su interacción desembocan en la producción de una idea, una obra de arte, una ecuación o un movimiento social. Tal como lo sostiene Ricardo Espinoza en su capítulo, el método hegeliano se hace cargo de la realidad como manifestación de una lógica y un método que la constituye y que permite entenderla a través de dos lecturas: una, que podríamos llamar generativa o epistemológica, con un énfasis en el hombre y otra, ontológica, con énfasis en las cosas. En el caso del lenguaje, existe una epistemología referida a su emergencia como fenómeno colectivo, su elaboración y modificación sucesiva, pero también está el lenguaje en tanto cosa, su estructura de símbolos y significados. Es interesante constatar en Hegel, como dice Espinoza, la concepción de la realidad como una red o matriz lógica y un método que representa el *"algoritmo mismo de la complejidad que expresa toda la realidad."* Sin duda la filosofía es inescapable para las ciencias de la complejidad y así lo han hecho ver otros pensadores como Paul Cilliers y Edgard Morin.

Pero la complejidad, lo que entendemos por sistema complejo y sus atributos definitorios, también evolucionan y son sujeto de cuestionamiento e investigación. Así lo hace ver el capítulo de Miguel Fuentes, donde se cuestiona el concepto de complejidad y su medición y uno de sus atributos principales, el de emergencia. Para Miguel Fuentes, estas son preguntas abiertas. En particular el concepto de propiedad emergente es problemático, puesto que lo que se denomina de esta manera, de acuerdo al autor es, en realidad, una medida de nuestra ignorancia sobre los mecanismos generadores del fenómeno que llamamos emergente, un estado transitorio de ignorancia sobre el sistema complejo,

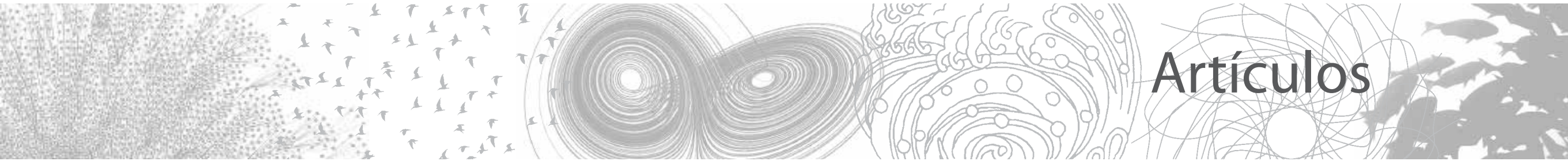
que el desarrollo de más y mejores teoría y evidencia empírica probablemente explicarán en el futuro.

El estudio de los sistemas complejos tiene larga data, desde los trabajos pioneros de Turing, von Neuman, Herbert Simon, Murray Gell-Mann, Prigogine, entre otros grandes pensadores, hasta su cristalización en instituciones como el Santa Fe Institute. Durante este tiempo, el estudio de los sistemas complejos pasaron de ser del dominio de grupos selectos de investigadores a representar parte importante de la investigación fundamental que se realiza en distintas disciplinas y particularmente la biología. De hecho, el estudio de redes de interacción está en la base de los grandes descubrimientos en la biología celular, en la ecología y en la sociología y economía de las últimas décadas. El estudio de la complejidad ha llegado a ser una necesidad inescapable, sobre todo en este siglo donde enfrentamos grandes problemas derivados del crecimiento de la población humana -ya somos más de 7 billones-, y de los cambios asociados a la modificación y deterioro de los sistemas naturales. Esto, sin duda, traerá grandes efectos sobre nuestro sistema social. La única manera de hacer frente a estos cambios es el reconocimiento de su complejidad y de nuestras limitaciones en su entendimiento. Para acrecentar esta comprensión, es necesario pensar en nuevas formas de generar conocimiento sobre el mundo, tal como algunos han expresado: "el mundo tiene problemas y las universidades departamentos."

En la base de los estudios sobre de la complejidad está la interdisciplina, el reconocimiento de que existen propiedades fundamentales de los sistemas complejos ya sean estos físicos, biológicos o sociales. La formación disciplinaria, sin duda es valiosa y necesaria pero así también lo es la formación interdisciplinaria que propone el estudio de la complejidad, una basada en problemas donde la concurrencia de una diversidad de visiones y disciplinas es ineludible.

En este sentido, el Instituto de Sistemas Complejos de Valparaíso y esta obra pretenden contribuir a crear un espacio interdisciplinario que nos permita entender el mundo y su complejidad e invitar a la comunidad a adentrarse en sus rutas.

Valparaíso, abril de 2014



# Artículos

## El valor de los enlaces: Redes y la evolución de las organizaciones<sup>1</sup>

César Hidalgo<sup>2</sup>

Un avión caza F-22 cuesta unos USD\$150 millones y pesa alrededor de 20.000 kg. por lo que un kilo de F-22 cuesta cerca de USD\$7.500. Comparado con un kg de oro, que en la actualidad<sup>3</sup> tiene un precio de alrededor de USD\$34.000, o un kg de plata que cuesta alrededor de USD\$500, un kg de F-22 es bastante caro; sin embargo, como chatarra, el mismo avión no vale mucho. Si fraccio una pieza de oro o plata en partes, el valor de cada una de ellas, comparada al total, será idéntico a la fracción que su peso, volumen o tamaño represente respecto al total. Esto no se aplica evidentemente a un avión caza F-22, ya que el valor de este, como el de cualquier instrumento sofisticado, está contenido en la manera en que sus piezas están ensambladas, y no en los materiales con los que están fabricados. En estos casos, podemos decir que el valor de estos bienes se encuentra en la red que conecta las diferentes partes, y las redes que hicieron posible que todas estas partes se unieran. El valor está “entre medio”, en los enlaces, en lugar de en los nodos. Un alambre de cobre es más valioso cuando conecta a dos personas por el teléfono, o a una planta de energía con la ciudad. Un teclado de computador es más valioso cuando está conectado a un computador, y este a un monitor y al tipo de electricidad correcta. En todo tipo de sistemas, el valor está en la red, por lo que —si queremos entender qué

1. Artículo traducido por Hugo González Vidal y revisado por Edmundo Bustos Azócar.
2. Director del Grupo de Investigación Macro Connections del MIT Media Lab. Ph. D. en Física, University of Notre Dame. Investigador Asociado del Instituto de Sistemas Complejos de Valparaíso.
3. Febrero de 2010.

valor tiene y cómo surge— necesitamos formas adecuadas de cuantificar la estructura de las redes que los productos tienen, y las redes que hacen que estos productos sean reales.

Las empresas y las instituciones no son solo grandes grupos de individuos. Son redes de personas que interactúan, a veces mediante jerarquías, pero en la mayoría de los casos, a pesar de ellas. La capacidad de una empresa para ser más productiva depende no solo del talento de sus empleados, sino, en gran medida, de la forma en la que estos interactúan. El valor de una organización o institución, al igual que el de un F-22, se encuentra, en gran parte, en la red existente entre sus miembros. Las redes que definen una organización, sin embargo, no son necesariamente los organigramas que vemos en la sala de reuniones de ella, sino más bien las que surgen de las interacciones informales que se producen entre sus miembros. Dos empresas, con el mismo organigrama, pueden tener diferentes destinos. ¿Podemos decir lo mismo de dos organizaciones caracterizadas por estructuras similares de redes informales?

Algunas pruebas que apoyan la hipótesis de que la estructura de la organización de redes sociales informales está relacionada con su actuación, se han puesto de manifiesto, por ejemplo, por el reciente trabajo de Kidane y Gloor (2007). Ellos observan las correlaciones entre la creatividad, el rendimiento y la estructura de la red de equipos de desarrollo de software de fuente abierta y concluyen que los grupos más centralizados tienen mejores resultados, en el sentido de que son capaces de corregir más errores que los grupos menos centralizados. También encontraron que la creatividad de los grupos, medida por el número de nuevas destrezas que alcanza o implementa durante un período de tiempo dado, es menor para los más centralizados. Como conclusión final, los hallazgos de Kidane y Gloor sugieren que el contrapeso entre el rendimiento del equipo y la creatividad podría reflejarse o estar mediado por la estructura que las redes sociales definen.

Las oscilaciones entre estructuras de redes centralizadas y descentralizadas han mostrado, empíricamente, ser una característica definitoria de los equipos creativos. Waber (Waber *et al.*, 2007) utilizó instrumentos sociométricos (una tecnología que se describe más adelante) para medir la interacción entre los diferentes equipos en un banco alemán, encontrando que la oscilación entre estructuras de red

más y menos centralizadas es una característica de los equipos encargados del diseño de nuevas campañas de marketing; sin embargo, esta oscilación no se producía en los equipos que no tenían que realizar tareas creativas.

Estos ejemplos ilustran cómo los detalles de la estructura de redes sociales informales en una organización están relacionados con el rendimiento de ella. También sugieren que, con el fin de adaptarse, las organizaciones necesitan ser flexibles, lo que se asocia a la capacidad de que sus redes puedan adquirir diferentes configuraciones. La flexibilidad podría ser la clave que les permita desarrollarse de forma adecuada y sobrevivir en el largo plazo. Para adaptarse de manera apropiada, necesitan lograr un cierto grado de conciencia de sí mismas, necesitan verse a sí mismas como las redes que son, una tarea que es extremadamente difícil de lograr para organizaciones de más de treinta o cuarenta personas.

Las industrias de manufactura están muy conscientes de la necesidad de comprender su propio funcionamiento y han aprendido a adaptar sus procesos de producción prestando atención a sus errores. La clave del éxito del sistema de producción Toyota (Toyota Production System, TPS), o “producción eficiente” (Lean Production), es su habilidad de convertir los errores de fabricación en experiencias de aprendizaje (Spear, 2009). Las empresas que operan en el marco de “producción eficiente” usan los errores para aprender y mejorar su proceso de producción. Esta es lo contrario a la producción en masa, que trata de evitar la propagación de errores en la línea de montaje, acumulando grandes inventarios en varios puntos del proceso de fabricación. La producción en masa fue exitosa en bajar los costos de producción; sin embargo, la disminución de los costos se produjo a un alto precio. El precio de bajar costos fue la adaptabilidad. Se cambiaron los costos de producción por la capacidad de aprender más acerca de sus propias debilidades. Adaptabilidad, sin embargo, es un precio que ninguna organización puede permitirse.

Tomar las ideas del TPS, o “producción eficiente”, basados en el conocimiento de las organizaciones, puede no ser tan simple. Esto es porque la mayoría de los errores en la línea de montaje tiene síntomas físicos bien definidos, tales como el bloqueo de una máquina o inconsistencias en los tiempos de entrega. Las “piezas” de muchas de las or-

ganizaciones privadas e instituciones de gobierno son personas, y las “líneas de montaje” que se mueven a través de ellas son redes sociales. Cualquier intento de aplicarles el TPS requiere, de una u otra forma, de un aumento del conocimiento que la organización tiene sobre sus propias interacciones sociales.

La ciencia de las redes, como una combinación de métodos de detección y técnicas de análisis, puede ayudar a las organizaciones a ser más conscientes de sí mismas. Las que comprenden sus propias redes, es probable que tengan una mejor oportunidad de adaptarse, en cuanto a que el conocimiento respecto de su configuración actual puede ayudar a la formulación, evaluación y el rendimiento de sus equipos de trabajo. En última instancia, esta conciencia de sí mismas puede mejorar su capacidad para adaptarse y sobrevivir. Pero para verse a sí mismas, deben ser capaces de observar no solo el rendimiento de sus miembros, sino también la manera en que estos están conectados. Entender una organización es comprender la dinámica de su red. Los lugares de trabajo son intrincados entornos sociales y políticos que pueden, colectivamente, realizar tareas que una persona sola no puede. Las organizaciones son súper-organismos gigantes con una conciencia tipo mercado que surge de la interacción entre varios individuos necesitados de información de individuos privados. La pregunta es entonces: ¿puede ayudar la ciencia de las redes a despertar este gigante? ¿La ciencia de las redes puede llevar la conciencia del súper-organismo al nivel siguiente?

En el siguiente par de secciones se revisa alguna de la literatura más estándar sobre la ciencia de las redes creada durante la última década. Ambas describen, en términos generales, algunas de las medidas que más comúnmente se utilizan para cuantificar la estructura de las redes. En las siguientes secciones, revisaremos la literatura sobre los estudios que utilizan estas medidas, junto con otras técnicas, para comprender la estructura y organización de las redes sociales del mundo real. Para un examen más exhaustivo de la ciencia de las redes y sus aplicaciones en otros campos científicos, sugerimos buscar en las siguientes revisiones (Borner *et al.*, 2007, Albert y Barabasi, 2002, Newman, 2003). Para obtener más información acerca de las tecnologías de sensores de organización, sugerimos (Pentland, 2008) como un buen punto de partida.

## Estructura de la red en el umbral del siglo XXI

La visualización de las redes puede ser inspiradora e intimidante a la vez. Una buena visualización puede ser muy informativa y, al mismo tiempo, estéticamente atractiva. Para algunas personas, el *look* “tecnológico” de una visualización de redes puede a veces ser intimidante. Sin embargo, es importante recordar que las redes son simplemente grupos de nodos y enlaces, puntos y líneas y, por lo tanto, los procedimientos más básicos utilizados para caracterizar su estructura son bastante sencillos.

Podemos comenzar caracterizando la estructura de una red recogiendo información acerca de un nodo y sus vecinos inmediatos (medidas locales). La más básica de estas medidas es el **grado** de un nodo, que normalmente es denotado por  $k$  y representa el número de enlaces que tiene (Fig. 1). Uno puede pensar en el grado de un nodo como el número de amigos que tiene una persona. En general, es útil ver cualquier red social recurriendo a analogías. El grado de un nodo es la medida más simple de una clase de medidas llamadas “medidas de centralidad”, las cuales son medidas creadas para cuantificar la importancia de un nodo en la red. Otras mediciones de importancia son, por ejemplo, la **centralidad de cercanía** (Bavelas, 1950), que nos dice cuál es la distancia promedio entre un nodo determinado de la red y todos los demás nodos o la **centralidad de intermediación** “*betweenness*” (Freeman, 1977), que nos indica el número de las rutas más cortas para conectar diferentes pares de nodos que pasan por medio de un nodo determinado.

Otra medición local que es ampliamente utilizada es el **coeficiente de aglomeración** (o *clustering*) del nodo, que mide la densidad de triángulos en los que un nodo está involucrado. Puede pensarse como la probabilidad de que dos amigos de un nodo sean también amigos entre sí (Fig. 1). Matemáticamente, el **coeficiente de aglomeración** de un nodo puede ser definido como:

$$C = \Delta / k(k-1) \quad (1)$$

donde  $\Delta$  es el número de triángulos en que un nodo participa, el factor  $k(k-1)/2$  representa el número total de triángulos en que los  $k$  vecinos



de ese nodo pueden potencialmente participar, que es igual al número de formas de elegir dos nodos entre  $k$  posibles.

También hay mediciones que se utilizan para caracterizar la estructura de una red recogiendo información global, lo que significa que son mediciones que tienen información que involucra, sino a todos, a la mayoría de los nodos de una red. Una medición importante acá es la **distribución de grado**, que es un histograma del grado de todos los nodos en la red.

La distribución de grado ha mostrado ser una característica específica de una red. En 1999, László Barabasi y Reka Albert mostraron que varias redes se caracterizaban por una distribución de grado que satisface una ley de potencias (Barabasi y Albert, 1999); matemáticamente esto significa que la probabilidad de que un nodo tenga  $k$  enlaces es proporcional a  $k^{-\gamma}$ , donde  $\gamma$  es una constante con un valor que se ha demostrado empíricamente, que en la mayoría de los casos está en el rango de  $2 < \gamma < 3$  (Albert y Barabasi, 2002). En términos cualitativos, la ley nos dice que unos pocos nodos en la red tienen un número de conexiones comparable con el número total de enlaces en toda la red, mientras que la mayoría de los otros nodos tiene un número de conexiones que es extremadamente pequeño. Los nodos con un número desproporcionadamente grande de conexiones son conocidos como *hubs*, y su existencia acarrea importantes consecuencias dinámicas para la red (Barabasi 2003). Barabasi y Albert acuñaron el término red libre de escala, o *scale-free network*, para hacer referencia a esta clase de redes.

Barabasi y Albert también presentaron un modelo simple que es capaz de generar redes de escala libre (Barabasi y Albert, 1999). El modelo Barabasi-Albert, o BA, puede generar una red libre de escala a través de la adición de nodos con un número fijo de enlaces. Un ingrediente esencial del modelo BA es que los nuevos nodos tienen una mayor probabilidad de conectarse a los nodos que están ya muy conectados. Este mecanismo, conocido como conexión preferencial y descubierto anteriormente por Yule (1940's) y Price (1970's), es una manera simple de generar modelos con una distribución de grado que satisfaga una ley de potencias. Yule y Price, sin embargo, nunca utilizaron este procedimiento para simular la estructura de una red.

La constatación de que muchas de las redes de los más diversos tipos se caracterizan por una distribución, como las de ley de potencia,

fue muy revolucionaria para la ciencia de las redes. Esta simple constatación no se esperaba de los modelos teóricos de redes disponibles en ese momento, que suponían que las conexiones ocurren al azar y, por lo tanto, las redes se caracterizaban por distribución de grado de Poisson o de caída exponencial. Hasta ese momento, muchos modelos teóricos de redes se habían construido en base al modelo de Erdős y Renyi, o ER (Erdos and Renyi, 1959), que fue desarrollado por los matemáticos Paul Erdős y Alfred Renyi por razones abstractas y, por lo tanto, no es una aproximación a la mayoría de las redes del mundo real.

La distinción entre las redes con una distribución de grado de “cola larga” —como las leyes de potencia—, y redes aleatorias, es más que una curiosidad estadística. Las redes libres de escala se comportan cualitativamente diferentes de las redes aleatorias; por ejemplo, cuando quitamos nodos de ellas. Un hecho muy estudiado es que la fracción de los nodos que siguen siendo parte del componente más conectado de una red libre de escala es comparable al número total de nodos en la red, incluso tras eliminar al azar un número considerable de nodos (Cohen *et al.*, 2000, Albert *et al.*, 2000). Esta propiedad no es compartida por las redes aleatorias que se fragmentan en varios componentes después de la eliminación de un número relativamente pequeño de nodos (Albert *et al.*, 2000). Sin embargo, cuando en lugar de eliminar nodos al azar lo hacemos de manera selectiva, sacando en primer lugar los nodos con los grados más altos y, a continuación, seguir hacia los de grados más bajos, las redes libres de escala se rompen más rápidamente que las aleatorias (Albert *et al.*, 2000, Cohen *et al.*, 2001). Por lo tanto, las redes libres de escala son más resistentes a la pérdida aleatoria de nodos que las redes de Erdos y Renyi, pero al mismo tiempo son considerablemente más susceptibles de caerse a pedazos bajo un ataque dirigido a los *hubs*.

Otra propiedad que separa a las redes libres de escala de las aleatorias es la manera en que estas afectan la propagación de información o enfermedades infecciosas. Pastor-Satorras y Vespignani (2001) mostraron que las redes de escala libre poseen un umbral epidérmico muy pequeño, lo que significa que en una red libre de escala los virus siempre tendrán una posibilidad de propagarse. Este fue un resultado sorprendente para el campo de la epidemiología que, hasta ese momento, estuvo dominada por modelos incapaces de incorporar la es-