





Teorías, métodos y modelos para la complejidad social:  
Un enfoque de sistemas complejos adaptativos





**COMUNICACIÓN  
CIENTÍFICA** PUBLICACIONES  
ARBITRADAS  
HUMANIDADES, SOCIALES Y CIENCIA



COLECCIÓN  
CONOCIMIENTO

Cada libro de Colección Conocimiento es evaluado para su publicación mediante el sistema de dictaminación doble ciego por especialistas en la materia.

Lo invitamos a ver el proceso de dictaminación de este libro transparentado en



**<https://www.comunicacion-cientifica.com>**

Ediciones Comunicación Científica se especializa en la publicación de conocimiento científico en español e inglés en soporte del libro impreso y digital en las áreas de humanidades, ciencias sociales y ciencias exactas. Guía su criterio de publicación cumpliendo con las prácticas internacionales: dictaminación, comités y ética editorial, acceso abierto, medición del impacto de la publicación, difusión, distribución impresa y digital, transparencia editorial e indización internacional.

# TEORÍAS, MÉTODOS Y MODELOS PARA LA COMPLEJIDAD SOCIAL: UN ENFOQUE DE SISTEMAS COMPLEJOS ADAPTATIVOS

FELIPE DE JESÚS LARA-ROSANO  
ALEJANDRO GALLARDO CANO  
SILVIA ALMANZA MÁRQUEZ



Primera edición en Ediciones Comunicación Científica S.A. de C.V. 2021

---

Lara-Rosano, Felipe de Jesús

Teorías, métodos y modelos para la complejidad social : un enfoque de sistemas complejos adaptativos / Felipe de Jesús Lara-Rosano, Alejandro Gallardo Cano, Silvia Almanza Márquez . —Ciudad de México : Comunicación Científica ; UNAM ; Conacyt, 2021. — (Colección Conocimiento).

p. 189 : il. ; 16.5 x 23 cm

1. Ciencias sociales 2. Cultura — Aspectos sociales I. Lara-Rosano, Felipe de Jesús, coaut. II. Gallardo Cano, Alejandro, coaut. III. Almanza Márquez, Silvia, coaut.

LC: HM621 L37

Dewey: 306 L37

---

D.R. © 2021, Felipe de Jesús Lara-Rosano, Alejandro Gallardo Cano, Silvia Almanza Márquez



Diseño de portada: Francisco Zeledón. Interiores: Guillermo Huerta.

D.R. Ediciones Comunicación Científica S.A. de C.V., 2020  
Av. Insurgentes Sur 1602, piso 4, suite 400,  
Crédito Constructor, Benito Juárez, 03940, Ciudad de México, México,  
Tel. (52) 55 5696-6541 • móvil: (52) 55 4516 2170  
infocomunicacioncientifica@gmail.com  
<https://www.comunicacion-cientifica.com>

ISBN: 978-607-99090-3-1

[doi.org/10.52501/cc.013](https://doi.org/10.52501/cc.013)

Este libro es una publicación de acceso abierto con los principios de Creative Commons Attribution 4.0 International License que permite el uso, intercambio, adaptación, distribución y transmisión en cualquier medio o formato, siempre que dé el crédito apropiado al autor, origen y fuente del material gráfico. Si el uso del material gráfico excede el uso permitido por la normativa legal deberá obtener el permiso directamente del titular de los derechos de autor.

# ÍNDICE

PRÓLOGO . . . . .	11
I. PROBLEMAS, COMPLEJIDAD	
Y CONOCIMIENTO CIENTIFICO . . . . .	13
Introducción . . . . .	13
Concepto de problema . . . . .	14
La primera etapa de la ciencia: los problemas simples . . . . .	17
La segunda etapa de la ciencia	
y los problemas de complejidad desorganizada . . . . .	20
La tercera etapa de la ciencia y los problemas	
de complejidad organizada (Weaver, 1948) . . . . .	22
II. LA NATURALEZA COMPLEJA DE LA REALIDAD . . . . .	
El concepto de problemática . . . . .	30
Proceso epistemológico, paradigma y modelo conceptual. . . . .	31
Conceptos sistémicos fundamentales . . . . .	33
Entorno o ambiente del sistema . . . . .	35
Variables sistémicas . . . . .	35
Análisis de la dinámica del sistema . . . . .	40
Espacio de estados del sistema . . . . .	41
Sistemas regulares y sistemas caóticos . . . . .	43
Sistemas causales y sistemas teleológicos . . . . .	44
III. EL ENFOQUE DE LOS SISTEMAS COMPLEJOS . . . . .	
Regiones en el espacio de estados . . . . .	48
Sistemas conservativos y sistemas disipativos. . . . .	49
Atractores y cuencas de atracción . . . . .	50
Atractores al borde del caos. . . . .	51
Estados atractores inerciales . . . . .	51

Atractores extraños y atractores complejos . . . . .	52
Solitones sistémicos . . . . .	53
Repulsores y cuenca de repulsión . . . . .	53
Aptitud de un sistema en un entorno . . . . .	54
Patrones de comportamiento de un sistema . . . . .	55
Autoorganización, memoria y atractores . . . . .	56
La teoría cibernética de los efectos. . . . .	56
Mecanismos cibernéticos de adaptación . . . . .	59
Cambios inducidos por el entorno. . . . .	62
Principio de la variedad requerida	
y principio de la complejidad requerida . . . . .	64
Complejidad y escala . . . . .	64
Principio de la escala de acciones requerida . . . . .	65
Funciones de información y control de los sistemas sociales . . . . .	66
Estructuras distribuidas en sistemas sociales . . . . .	68
Estructura interna de una organización	
distribuida de un sistema social . . . . .	68
Características del alto acoplamiento . . . . .	69
Características del acoplamiento ligero . . . . .	69
Características del acoplamiento intermedio al borde del caos . . . . .	70
Paisaje de hoyos de estabilidad . . . . .	71
<b>IV. LOS SISTEMAS ADAPTATIVOS COMPLEJOS (SAC). . . . .</b>	<b>73</b>
Sistemas adaptativos complejos y su función homeostática . . . . .	75
Redundancia en un sistema. . . . .	77
Resiliencia de un sistema . . . . .	78
Redes sistémicas complejas adaptativas . . . . .	78
Los sistemas sociales y humanos como	
Sistemas Adaptativos Complejos . . . . .	78
Dinámica de interacción social autoorganizativa	
hacia un orden emergente . . . . .	83
Análisis funcional de un sistema social	
mediante el microanálisis sintético . . . . .	85
Método de construcción sistémica por descomposición. . . . .	86



Método de construcción sistémica por composición. . . . .	90
Círculo hermenéutico en el microanálisis sintético . . . . .	92
Diseño y construcción de la solución como SAC . . . . .	93
Diagnóstico crítico de instituciones disfuncionales para resolver problemas sociales. . . . .	94
Metodología para resolver un problema social complejo . . . . .	96
Sistemas con colectivos . . . . .	97
El efecto estabilizador de los colectivos: una analogía de las ciencias de la complejidad . . . . .	99
Agrupándose en las organizaciones . . . . .	99
Colectivos suprasistémicos (redes sistémicas) . . . . .	100

## APÉNDICE. INTRODUCCION HISTÓRICA

AL PENSAMIENTO COMPLEJO . . . . .	103
Introducción . . . . .	103
Mirarlo todo desde todos lados. . . . .	104
Cambio, unidad, inestabilidad, emergencia: las propiedades de la realidad compleja. . . . .	107
La transdisciplina: comunicación entre campos diversos del conocimiento. . . . .	109
La realidad multidimensional y la lógica multivaluada: factores de la transdisciplina . . . . .	110
El tercer factor: la complejidad . . . . .	112
La transdisciplina y el pensamiento complejo en la investigación de la realidad . . . . .	115
Sobre los orígenes de la Teoría de los Sistemas Complejos . . . . .	116
Cannon y la homeostasis . . . . .	120
Von Bertalanffy y la Teoría General de Sistemas . . . . .	121
La cibernética de Norbert Wiener y Arturo Rosenblueth . . . . .	122
Seis aspectos de la Cibernética . . . . .	123
Los Subsistemas funcionales de Parsons (AGIL) . . . . .	124
La Ingeniería de Sistemas de Hall . . . . .	124
Von Foerster y la Cibernética de Segundo Orden . . . . .	125

Los Sistemas Suaves y Checkland . . . . .	126
La fractalidad de Mandelbrot. . . . .	127
Fractales y sistemas . . . . .	129
La teoría del caos. . . . .	130
Progogine, disipación, autoorganización e inestabilidad perpetua . . .	131
Sistemas al borde del caos. . . . .	132
Elementos y nociones universales de la Teoría de Sistemas Caóticos . . . . .	133
Zadeh y Desoer y el enfoque de estados del sistema . . . . .	133
Sistemas causales y teleológicos . . . . .	136
Sistemas Adaptativos Complejos. . . . .	136
Propiedades comunes de los sistemas complejos. . . . .	142
La arquitectura de los sistemas: redes por todas partes. . . . .	143
Tipos universales de redes . . . . .	144
Redes físicas y biológicas . . . . .	144
Redes tecnológicas. . . . .	146
Redes de información y conocimiento. . . . .	147
Las redes sociales. . . . .	149
Redes sociales y matemáticas . . . . .	151
El salto del grillo, o los chirridos sincrónicos de una red . . . . .	153
Rich gets richer. . . . .	154
Propiedades universales de las redes. . . . .	157
 GLOSARIO. . . . .	 159
 REFERENCIAS . . . . .	 177

## PRÓLOGO

México se encuentra en perpetua interacción con un entorno turbulento tanto natural como social a nivel global. Por lo anterior, nuestros problemas sociales, económicos y políticos son difíciles de abordar con los enfoques reduccionistas tradicionales, y su tratamiento mediante el análisis teórico tradicional y las teorías asociadas de planeación y administración lineales es muy limitado (Wallerstein, 2001).

Para enfrentar estos retos, nuestros sistemas sociales deben enfocarse como sistemas dinámicos, no lineales, interactivos, capaces de adaptación, aprendizaje e innovación y con una tendencia a estructurarse en redes complejas (Byrne, 1998).

El objetivo del libro es abordar de manera rigurosa los conceptos, métodos y técnicas del enfoque de los *sistemas complejos* al análisis, la planeación y la gestión de sistemas sociales desde el punto de vista de las *ciencias de la complejidad* y de las nuevas teorías sociales, y cómo aplicar las técnicas de modelado computacional de sistemas dinámicos para resolver problemas complejos de carácter social, dando las bases de una meta-metodología de la complejidad social y apoyar la formación de recursos humanos capacitados en el enfoque de los sistemas complejos.

En el primer capítulo, Introducción histórica al pensamiento complejo, se revisa la revolución científica y el cambio de paradigma más importante de la historia de la ciencia, que comprende los sistemas no lineales, la teoría general de sistemas, la transdisciplina, la cibernética de primer y segundo orden, los sistemas complejos y el conjunto de corrientes que integran las ciencias de la complejidad. En el segundo capítulo, La naturaleza compleja de la realidad, se revisan las características de una realidad compleja que hay que tomar en cuenta para mejorar tanto el diagnóstico como la intervención para resolver problemas complejos de carácter social y dar las bases de una meta-metodología de la complejidad social.

La solución de un problema social requiere tres fases:

- 1) Definición del usuario, del sistema, de su entorno, de los enfoques de las ciencias de la complejidad aplicables y la construcción del modelo conceptual y, eventualmente, computacional del problema. Es imprescindible identificar primeramente al sujeto que tiene el problema, que puede ser un individuo, un colectivo, un sistema social, etc., porque en función del sujeto es que se define el problema como discrepancia entre una realidad y lo que el sujeto desearía tener como realidad específica. También

hay que identificar las disciplinas de conocimiento que tienen que ver con el problema para constituir el equipo transdisciplinario de investigación. A continuación, hay que definir el sistema, que es la fracción de una realidad compleja donde se origina el problema, así como el entorno constituido por porciones de la realidad que influyen en el sistema o bien que son influidas por él. En tales consideraciones hay que tomar en cuenta que el problema a resolver es el que dicta tanto las dimensiones a tomar en cuenta en el sistema como en el entorno. Sobre esta base se definen las variables que deben considerarse en el análisis sistémico y se emprende el análisis del sistema aplicando la metodología del microanálisis sintético por descomposición y por recomposición para construir un modelo conceptual del problema. Estas actividades deben ser el producto de talleres participativos en los que participe tanto el equipo de investigación como el sujeto que tiene el problema.

2) Diagnóstico del problema y planeación de la solución. Con el auxilio del modelo conceptual y eventualmente de un modelo computacional se hace un diagnóstico participativo de la realidad y una definición participativa de lo deseable para disminuir su discrepancia, integrando al usuario en estos procesos. Sobre este diagnóstico se definen las acciones de cambio deseables y factibles para resolver el problema, que tienen que definirse mediante una interacción guiada diversificada auto-organizante, que integre una planeación auto-organizada de acciones.

3) Implantación y seguimiento de la solución. El proceso de solución debe ser dinámico, construyendo una organización adaptativa compleja para ser operado por el usuario mediante un proceso de autoorganización, guiado por el equipo investigador. Esta organización adaptativa compleja será una organización específica, con la capacidad de enfrentar el contexto complejo de forma apropiada y dinámica, evaluando y adecuando su aptitud frente a la complejidad. Para ello, habrá que definir un estado deseable y construir ahí un atractor, situado en el horizonte de planeación hacia donde converja el sistema en virtud de su dinámica interna. Para que esto sea factible hay que encontrar la cuenca de atracción de la solución y llevar al sistema actual hacia esa cuenca de atracción mediante acciones de intervención para que, a partir de ahí, la dinámica del sistema lo lleve a la solución. Esto implica conocer el sistema y conocer su contexto. Con esto, el diseño e implementación de una organización adaptativa que resuelva en forma colectiva y dinámica un problema social complejo, creará y reforzará valores sociales en la comunidad usuaria que estimulará el desarrollo de ésta con más autonomía, sentido de colaboración, cohesión social, educación, equidad y responsabilidad social.

## I. PROBLEMAS, COMPLEJIDAD Y CONOCIMIENTO CIENTIFICO

### Introducción

La solución de los problemas sociales de México es función tanto de su adecuado planteamiento como de aplicar las teorías y técnicas más avanzadas del análisis social (Crone, 2011), para disponer eficientemente de sus recursos naturales, mejorar su organización productiva, distribuir de manera más equitativa las aportaciones y los beneficios sociales en su población, y enfrentar las amenazas del entorno aprovechando sus oportunidades.

Sin embargo, México es afectado a nivel global, por los siguientes factores: *a)* las condiciones del entorno cuyo grado de impacto depende del contexto y de las decisiones que se tomen tanto a nivel interno como externo; *b)* la vulnerabilidad histórica del país frente a los intereses de las potencias globales del momento; *c)* la falta de integración de la sociedad mexicana a nivel social, económico, regional y cultural; lo cual implica una multiplicidad de grupos sociales diversos y desconectados, una polarización del ingreso nacional y regional, y una inequidad distributiva en términos de costos y beneficios sociales con una gran marginalidad.

Por ello, en este trabajo se dedica el primer capítulo a presentar el concepto de problema y la forma como se puede resolver.

Los grandes problemas nacionales son complejos. En cada uno hay un sinnúmero de factores relevantes interactuando generalmente de maneras no lineales, actuando a diversas escalas que cambian en el tiempo, modificando incluso sus premisas causales. Dadas estas características, los marcos tradicionales de la ciencia resultan inadecuados e insuficientes. Por ello es imprescindible y urgente emprender una nueva manera de hacer ciencia.

Las *ciencias de la complejidad*, a través de su perspectiva particular, su marco conceptual, sus metodologías novedosas y su convicción de transversalidad y transdisciplinariedad, abren nuevos caminos a la identificación, comprensión, prevención o solución de las grandes problemáticas nacionales y globales. Su pertinencia ha sido reconocida y, paulatinamente, se ha convertido en una nueva manera de hacer ciencia que ha revolucionado la física, la química y la biología y que comprende, entre otras, la Teoría de los Sistemas no lineales (Nicolis, 1995); los sistemas autoorganizados (Kauffman, 1993); los sistemas dinámicos adaptativos complejos (Buckley, 1968); la teoría de las redes (Newman, Barabási y

Watts, 2006); las lógicas no clásicas (Zadeh, 1965; Rescher, 1969); la teoría de las catástrofes (Poston y Stewart, 1977); la teoría del caos (Ruelle y Takens, 1971) y la geometría fractal (Mandelbrot, 1987).

Nuestra propuesta es aplicar este nuevo enfoque al análisis social, desde los últimos avances de las ciencias sociales, basados en la interacción de los agentes sociales (Stacey, 2001), la autoorganización (Kauffman, 1993), la autopoiesis (Luhmann, 1984) y la emergencia social (Sawyer, 2005).

## Concepto de problema

Los hombres, en su vivir cotidiano y sus sistemas sociales, no se hallan aislados sino inmersos en una realidad diversificada y dialéctica que ejerce influencias decisivas sobre ellos (Lara-Rosano, 1990). Estas influencias son, en relación con sus acciones y sus deseos, a veces positivas —favoreciendo el logro de sus objetivos— y otras veces, negativas —oponiéndose no sólo al logro de sus objetivos, sino representando inclusive un obstáculo para su propia existencia—. Así, por ejemplo, la llegada del invierno en ciertas latitudes puede constituir un verdadero reto a la supervivencia humana, y lo mismo puede decirse de otros fenómenos naturales como los ciclones, las sequías, los sismos, etc. Entonces, el hombre y sus comunidades, ante una realidad hostil o no deseable, deben emprender acciones que modifiquen esa realidad hasta hacerla compatible e incluso favorable a sus propios propósitos.

Así, el ser humano ha desarrollado la capacidad de modificar su realidad a través de sus acciones para hacerla más apropiada a sus objetivos. La historia de la humanidad está caracterizada por etapas de desarrollo en las que el hombre se ha ido imponiendo a la naturaleza, haciéndola cada vez más favorable para el logro de sus fines. Ejemplos de ello lo constituyen el desarrollo de la ganadería, la invención de la agricultura, el aprovechamiento de la energía hidráulica, fósil y nuclear, el aprovechamiento de los recursos marinos, etcétera.

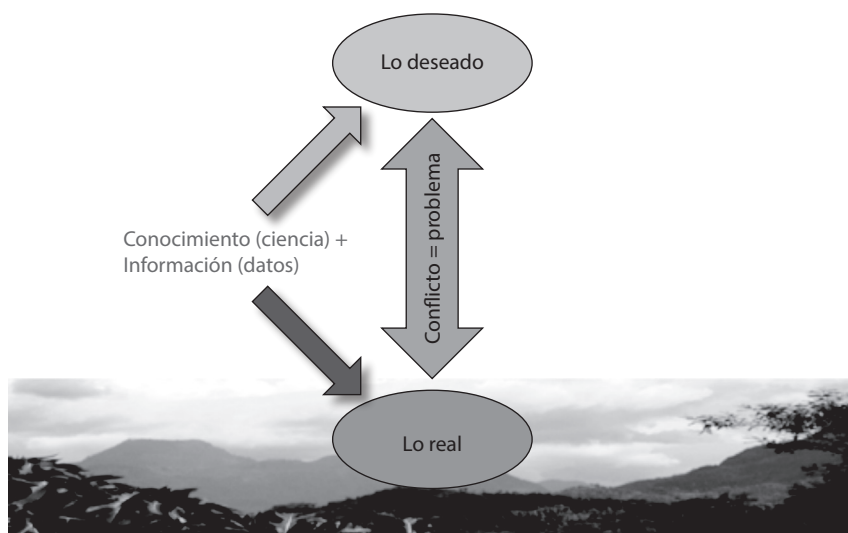
Ahora bien, para que esta acción humana modificadora de la realidad se presente es necesario, previamente, que el hombre perciba la existencia de un conflicto entre lo que él desea y lo que tiene, entre lo real y lo deseable ya que, en la medida en que este conflicto sea percibido, se verá motivado a actuar en el sentido de resolverlo modificando la realidad o sus deseos en forma pertinente. Este conflicto entre lo real y lo deseado es lo que aquí definimos como un *problema*. Esta definición es tan gene-

ral que puede aplicarse a cualquier tipo de problema, desde los personales o familiares hasta los problemas globales (Lara-Rosano, 1990).

En resumen, cualquier tipo de problema que un individuo o un sector de la sociedad pueda tener se puede definir siempre en términos de una discrepancia entre lo real y lo deseado.

Lo anterior puede apreciarse mejor en las figuras I.1 y I.2.

FIGURA I.1. Dialéctica entre la realidad y un sistema social



De acuerdo con el concepto de problema presentado anteriormente, los elementos de éste son:

- a) Un elemento objetivo con existencia independiente del sujeto que tiene el problema y que es lo real.
- b) Un elemento subjetivo, cuya existencia sí depende del sujeto que tiene el problema y que constituye lo deseado por él.

La solución de un problema consiste entonces en la solución de la divergencia entre estos dos elementos.

Al solucionar un problema mediante el cambio pertinente de lo real puede suceder, y de hecho sucede frecuentemente, que el proceso de cambio genere nuevos conflictos, entre lo real y lo deseado, que dan lugar a nuevos problemas. Así, la construcción de un nuevo aeropuerto fuera de la mancha urbana puede ocasionar problemas de acceso a los usuarios

del mismo, que requieran ser resueltos mediante inversiones en infraestructura especial, carretera y ferroviaria. Por lo tanto, es deseable que las decisiones que se tomen respecto al cambio sean precedidas de un conocimiento suficiente de sus implicaciones y probables impactos, para evitar que se generen problemas más graves que los que se trataban de solucionar. Es, precisamente, función del análisis sistémico el advertir sobre las implicaciones a largo plazo de las acciones de cambio, propuestas para evitar soluciones aparentes de efecto inmediato pero de graves repercusiones a la distancia para el conjunto de la sociedad o de uno de sus sectores. Esto implica que toda decisión de acción y, por lo tanto, de intervención y cambio debe hacerse siempre en función de un conocimiento objetivo y profundo de la realidad y del problema específico a resolver, y de un análisis y evaluación cuidadosos de las alternativas de solución. Para ello hay que recurrir a la ciencia que, en conjunto con la información relevante proporcionada por los datos del caso, nos daría el conocimiento objetivo de dicha realidad y sus posibilidades de cambio (Lara-Rosano, 1990).

FIGURA 1.2. El problema como discrepancia entre lo real y lo deseado





## La primera etapa de la ciencia: los problemas simples

Como herencia del pensamiento griego, el mundo occidental adopta los tres valores platónicos fundamentales: la Verdad, el Bien y la Belleza. En la Edad Media, la Iglesia —como gestora de la religión y monopolizadora de la ideología— se convierte en el árbitro supremo de estos tres valores que conjuga en Dios. Así, la Verdad suprema es la verdad revelada en la Biblia; el Bien supremo radica en la salvación, en tanto que la Belleza suprema se manifiesta en el arte sacro (escultura, pintura y música) y en la arquitectura gótica de las catedrales.

Sin embargo, a partir del Renacimiento surge la física como ciencia, con Copérnico, Kepler, Galileo, Bacon, Descartes y Newton, para conocer la verdad del mundo físico. Copérnico y Galileo arrebatan a la Iglesia su monopolio de la verdad, confrontando sus descubrimientos científicos con los dogmas bíblicos, en tanto que los humanistas vuelven los ojos a la filosofía griega, movimiento que culmina en la Ilustración cuando las humanidades desplazan a la teología.

Un mecanismo es definido por Kant como una unidad funcional en la cual las partes del mecanismo, aunque tienen una existencia propia, se acoplan una con la otra para ejecutar una función. Por ejemplo, en un reloj, sus partes están ensambladas en un mecanismo que tiene la función de medir el tiempo. Las partes son sólo partes del reloj en cuanto necesarias para el funcionamiento del todo: el reloj.

Para la física, la naturaleza y el universo físico son mecanismos, y las partes de estos mecanismos se comportan siguiendo leyes universales que permiten explicar y predecir su comportamiento. Así, el objeto de las ciencias es pues la búsqueda de la verdad, descubriendo las leyes universales que rigen el universo mediante la investigación empírica y el método hipotético-deductivo. A partir del Renacimiento, el funcionamiento del mundo y la naturaleza se explica entonces agregando y superponiendo el comportamiento de las partes:

Gran parte de la física clásica se construye despreciando o linealizando los factores no lineales, por la imposibilidad en general de resolver analíticamente las ecuaciones no lineales. La linealización tiene además la ventaja de hacer valer el principio de superposición: si se tienen soluciones a una ecuación, la suma de ellas es otra solución.

Lo que se omite en un enfoque reduccionista es la mutua relación entre las partes de un objeto y cómo unas partes dependen de otras que, a su vez, dependen de las primeras, dando origen a relaciones no lineales de interdependencia y retroalimentación.

Así, los científicos clásicos estudian las partes que son los constituyentes universales: elementos, moléculas, átomos, partículas subatómicas, pero éstas en sí no explican las propiedades emergentes del todo. Uno de los principales errores al enfocar un problema es pensar que el problema está en las partes cuando generalmente está en las relaciones entre ellas. Por ejemplo, el cloro —un gas agresivo y venenoso— y el sodio —un metal muy reactivo que hace hervir el agua— se unen para formar el cloruro de sodio o sal de mesa que lejos de ser un veneno es un compuesto esencial para la vida, cuyas propiedades emergentes no las pueden explicar las propiedades de los componentes.

Los principios que sigue este paradigma de las leyes naturales son:

- a) El movimiento de un cuerpo es perfectamente predecible de acuerdo con las leyes naturales universales y los estados óptimos de mínima energía.
- b) Los cuerpos tienen partes que se agregan en un todo.
- c) Todo fenómeno tiene una causa, y dos causas idénticas tienen idénticos efectos.
- d) El todo es la suma de sus partes.
- e) El estado natural de las cosas es el equilibrio.
- f) En consecuencia, un mecanismo se mueve de manera estable en el tiempo, y el cambio es un movimiento predeterminado y totalmente predecible.
- g) El sentido del tiempo es irrelevante.

De acuerdo con Weaver (1948), los siglos XVII, XVIII y XIX constituyeron la época en que la física se enfocó a analizar problemas simples de unas cuantas variables, tales como: tiempo, posición y velocidad; fuerza, masa y aceleración en mecánica; o bien volumen de un gas, presión y temperatura, en física, de los gases; ángulo de incidencia, ángulo de reflexión y distancia focal en óptica, o diferencia de potencial, intensidad de corriente y resistencia en electricidad. Este conocimiento nos trajo la tecnología necesaria para la revolución industrial que transforma radicalmente el modo de producción. Así, del desarrollo sostenido de la física surge la tecnología moderna y la Revolución industrial, que cambia el mundo. Entra en auge el capitalismo.

De esta forma, Watt inventa la máquina de vapor en 1774, y en 1817 Stephenson inventa la locomotora de vapor con lo que en 1830 se inaugura la primera línea férrea. En 1837 Morse inventa el telégrafo; en 1867 Siemens inventa el dínamo; en 1876 Bell inventa el teléfono; en 1877 Edison inventa el fonógrafo; en 1879 Siemens inventa la locomotora eléctrica.

ca; en 1884 Daimler inventa el motor de gasolina y en 1885 construye el primer automóvil.

El método científico natural es por el que los humanos pueden conocer la realidad tanto de la estabilidad como del cambio a través de observación cuidadosa, formulando hipótesis y luego probándolas empíricamente. Este tipo de hipótesis se enfoca inmediatamente en relaciones de causa-efecto, que tienen una estructura: si... entonces... aplicada a una parte del todo. En otras palabras, el método científico involucra un enfoque reduccionista en el que la atención se enfoca en las partes de un fenómeno. Esas partes se comportan predeciblemente de acuerdo con una ley natural, pero las partes no explican las propiedades emergentes del todo. La interacción entre ellas se sigue de la naturaleza de cada parte.

En esta primera etapa de la ciencia, el científico natural toma la posición de observador externo, considera el fenómeno seleccionado como un mecanismo, lo analiza en sus partes e identifica sus leyes, aplicando principios óptimos. Como el entorno puede perturbar los experimentos introduciendo influencias externas indeseables, para evitar estas perturbaciones se crean los laboratorios como espacios cerrados y aislados a influencias externas, por lo cual se descarta el concepto de sistema abierto. Su método y el éxito de sus resultados confieren a la física el estatus de depositaria de la verdad, y las otras ciencias tratan de imitar sus métodos mientras las humanidades se concentran en el estudio del bien y de la belleza. El positivismo se convierte en la nueva religión (Lara-Rosano, 2016a).

Este método sirve para sistemas físicos pequeños y sencillos, donde las partes existen independientemente unas de otras, no hay retroalimentaciones que las hagan causalmente recursivas, y para cuando el rango de operación de un sistema físico es tan limitado que, aunque tenga un comportamiento no lineal, éste se pueda modelar para efectos prácticos mediante aproximaciones lineales.

Como reacción al despotismo ilustrado y producto de la emergencia de la burguesía, la Revolución francesa proclama la búsqueda del bien social, y empiezan a surgir las ciencias sociales que tratan de llegar a la verdad social para poder establecer el bien social (Lara-Rosano, 2016a). El primero en proponer una investigación científica de los fenómenos sociales, la política y la moral fue Henri de Saint-Simon (1760-1825). Auguste Comte, quien fue secretario de Saint-Simon entre 1817 y 1823, desarrolló sus teorías sociales bajo el enfoque del positivismo creando la palabra sociología, que aparece por primera vez impresa en su *Curso de filosofía positiva* de 1838. Así, las nacientes ciencias sociales se alinean al enfoque positivista derivado de las ciencias naturales.

Sin embargo, las interacciones sociales son no lineales y no deterministas, presentan explicaciones teleológicas y fenómenos emergentes. En conclusión, el reduccionismo de las leyes físicas no puede aplicarse indiscriminadamente en el análisis de prácticas sociales, mientras que las ciencias de la vida y las ciencias sociales, en las que estos problemas simples no son a menudo significativos, no llegaron a tener un carácter altamente cuantitativo o analítico.

## La segunda etapa de la ciencia y los problemas de complejidad desorganizada

La dinámica clásica del siglo XIX fue muy adecuada para analizar y predecir el movimiento de una sola bola de marfil cuando se mueve en una mesa de billar. De hecho, la relación entre las posiciones de la bola y los tiempos en que llega a éstas constituyen un típico problema de simplicidad decimonónica. Uno puede, pero con un aumento sorprendente en dificultad, analizar el movimiento de dos o incluso tres bolas en una mesa de billar.

Sin embargo, si tenemos un recipiente cerrado que contiene un gas con miles de millones de moléculas o una gran mesa de billar, con millones de bolas rodando sobre su superficie, chocando unas con otras y con los carriles laterales, el método tradicional de resolver estos problemas ya no es aplicable. Es entonces cuando las ciencias físicas desarrollaron un nuevo enfoque hacia el conocimiento de la naturaleza de un tipo esencial y radicalmente nuevo, con base en la mecánica estadística.

Bajo la influencia de los físicos y los matemáticos, los científicos se preguntaron cómo podrían analizar fenómenos en los que intervinieran una infinidad de partes independientes, interactuando entre sí con toda libertad, como un gas encerrado en un recipiente o una población de una ciudad, víctima de una epidemia.

Es entonces cuando la matemática desarrolló un nuevo enfoque para estudiar fenómenos colectivos integrados por una multitud de partes o agentes, comportándose e interactuando en forma libre y desorganizada. Este nuevo enfoque se basó en el manejo de variables probabilísticas que podían tomar cierto valor con cierta probabilidad, según un patrón de probabilidades. Este patrón se denomina la distribución de probabilidad de la variable y se representa mediante una curva llamada función de densidad de probabilidad, que tiene la propiedad de que el área bajo la curva entre dos valores  $x(1)$  y  $x(2)$  de la variable es la probabilidad de que el valor de esta variable esté en el intervalo entre  $x(1)$  y  $x(2)$ .

La función de densidad de probabilidad más utilizada es la función normal o gaussiana, que tiene una forma acampanada, con dos colas y es simétrica con respecto al valor del promedio aritmético de la variable. Además es asintótica, lo que quiere decir que la curva se acerca cada vez más al eje de las abscisas  $X$  pero jamás llega a tocarlo. Es decir, las colas de la curva se extienden de manera indefinida en ambas direcciones. Su expresión matemática es:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left\{ -\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2} \right\} \quad \text{donde} \quad -\infty < x < +\infty$$

Cualquier transformación lineal de una variable con distribución normal tiene también una distribución normal, y cualquier combinación lineal de variables normales independientes tiene también una distribución normal.

La importancia de la distribución normal proviene de su empleo generalizado para analizar numerosos fenómenos naturales, fisiológicos, sociales y psicológicos donde se utilizan promedios estadísticos, tales como la estatura y el peso; respuestas fisiológicas como el efecto de un fármaco en una población; patrones sociológicos como los hábitos de consumo; caracteres educativos como el nivel de escolaridad, etc. Así surge la estadística como el análisis de los promedios para abordar los problemas de complejidad desorganizada en física, química, biología, sociología, economía, demografía, psicología y otras ciencias sociales cuando necesitan abarcar millones de agentes. La gran sorpresa es que ahora un problema de índole nacional, en un país con millones de habitantes, se hace más fácil porque los métodos de la estadística son aplicables.

Estas técnicas no permiten conocer el comportamiento de todas esas variables en forma individual, pero el sistema en su conjunto presenta ciertas propiedades promedio, analizables, que permiten resolver problemas prácticos, por ejemplo, en una nación ¿cuántos nacimientos en promedio hay en un año, o cuál es el promedio de ingreso mensual de los trabajadores asalariados o cuál es el promedio de escolaridad de la población mayor de 18 años o cuál es la esperanza de vida de un niño al nacer?

De este modo, las técnicas estadísticas no están restringidas a situaciones en las que existe una teoría científica de los eventos individuales —como en el ejemplo del billar donde hay una teoría muy precisa para el impacto de una bola en otra—, sino que también se pueden aplicar a situaciones como el ejemplo de la esperanza de vida al nacer, donde el

evento individual como la muerte de un ser humano que acaba de nacer es impredecible.

Por otro lado, en las ciencias físicas, las leyes de la termodinámica, que describen tendencias básicas e inevitables de todos los sistemas físicos, se derivan también a partir de consideraciones estadísticas. “De hecho, todo el problema de la evidencia y la forma en que el conocimiento científico se puede deducir de esa evidencia se han reconocido como dependientes de estas mismas ideas estadísticas, de modo que las nociones de probabilidad son esenciales para cualquier teoría del conocimiento mismo” (Weaver 1948).

### La tercera etapa de la ciencia y los problemas de complejidad organizada (Weaver, 1948)

En la segunda etapa de la ciencia se enfocan los problemas que afectan a la mayoría de una población de agentes, a través de considerar los promedios y la parte media de las curvas de densidad de probabilidad, pero se ignora y desprecia el comportamiento de las colas de la distribución, considerándolas como pobladas de casos atípicos o excepcionales. Sin embargo, son precisamente estos fenómenos atípicos los que están detrás de nuestros problemas más complejos, como los problemas de desigualdad social, de marginación, de analfabetismo, de individuos con capacidades diferentes, de delincuencia juvenil, etc. Por otra parte, existen problemas que, en contraste con las situaciones desorganizadas a las que las estadísticas pueden hacer frente, muestran fundamentalmente la presencia de una organización entre los elementos del problema, caracterizándose como problemas de complejidad organizada. ¿Por qué la esperanza de vida es mayor en las mujeres que en los varones? ¿Por qué hay predisposiciones genéticas a ciertas enfermedades y no a otras? ¿Por qué una sustancia química es fundamental para la vida como el cloruro de sodio cuando sus elementos químicos aislados son venenos? ¿De qué depende el precio internacional del petróleo? ¿Cómo puede el peso mexicano estabilizarse frente al dólar con prudencia y eficacia? (Lara-Rosano, 2016a).

Todos estos problemas y una amplia gama de problemas similares, en lo biológico, médico, psicológico, económico, social y político, son problemas complejos pero no son problemas de complejidad desorganizada, apropiados para ser resueltos por métodos estadísticos tan eficaces en describir el comportamiento promedio en problemas de complejidad desorganizada, sino que son problemas que implican considerar un número

importante de factores interrelacionados en un todo orgánico, resultando problemas de una complejidad organizada.

Weaver, afirma:

It is soberly true that science has, to date, succeeded in solving a bewildering number of relatively easy problems, whereas the hard problems, and the ones which perhaps promise most for man's future, lie ahead. [Weaver, 1948, pp. 540-543.]

Traducción: La ciencia ha tenido éxito hasta la fecha en resolver un número gigantesco de problemas relativamente simples, mientras que la solución de los problemas difíciles y de los que tal vez prometen el mayor impacto en el futuro de la humanidad está todavía pendiente.

These new problems, and the future of the world depends on many of them, requires science to make a third great advance, an advance that must be even greater than the nineteenth-century conquest of problems of simplicity or the twentieth-century victory over problems of disorganized complexity. [Weaver, 1948, pp. 540-543.]

Traducción: Estos nuevos problemas y el futuro del mundo, que depende de muchos de ellos, requieren que la ciencia haga un tercer gran avance, un avance que debe ser aún mayor que el decimonónico (conquista de los problemas simples) o el del siglo xx (victoria sobre los problemas de complejidad desorganizada).

Weaver, sin embargo, predice:

Some scientists will seek and develop for themselves new kind of collaborative arrangements; that these groups will have members drawn from essentially all fields of science; and that these new ways of working, effectively instrumented by huge computers, will contribute greatly to the advance which the next half century will surely achieve in handling the complex, but essentially organic, problems of the biological and social sciences. [Weaver, 1948, p. 542.]

Traducción: Algunos científicos buscarán y desarrollarán por sí mismos nuevos tipos de acuerdos de colaboración y estos grupos tendrán miembros procedentes de todos los campos de la ciencia. Estas nuevas formas de hacer ciencia, efectivamente instrumentadas por grandes equipos de cómputo, contribuirán grandemente al avance que el próximo medio siglo seguramente logrará al abordar los problemas complejos y esencialmente orgánicos de las ciencias biológicas y sociales.

La ciencia empieza a aprender a lidiar con estos problemas de la complejidad organizada. En efecto, cientos de estudiosos de todo el mundo ya están avanzando en este tipo de problemas a través de las ciencias de la complejidad, la transdisciplina, la computación y la ciencia de los datos. Las evidencias particulares son que, como nunca antes, los métodos experimentales cuantitativos, los métodos de modelado computacional y simulación, y los métodos analíticos de las ciencias de los datos se están aplicando ya a la biología, la medicina, la economía, la educación, la astronomía e incluso a la antropología y las demás ciencias sociales. Los resultados son altamente prometedores [Lara-Rosano, 2016a].

En el siguiente capítulo analizaremos por qué el conocimiento de la realidad actual nos presenta tantos retos que la ciencia anterior al siglo XXI es incapaz de afrontar, haciéndose necesario un cambio de fase en el así llamado método científico que, de acuerdo con Weaver (1948), es la tercera etapa de la ciencia: la orientada hacia los problemas de una complejidad organizada y que ya identificamos con las ciencias de la complejidad.



## II. LA NATURALEZA COMPLEJA DE LA REALIDAD

Desde mediados del siglo xx, al finalizar la segunda Guerra Mundial, nuestra realidad ha cambiado. El desarrollo de la computación y las telecomunicaciones han creado un mundo fuertemente acoplado donde los procesos sociales y ambientales se han globalizado. En efecto, tenemos ahora un intercambio global de gente, dinero, bienes, información e ideas que ha determinado la globalización financiera y económica, que orilla a cada país a desenvolverse en un entorno de competitividad global. Por otra parte, el desarrollo acelerado de la industria en el mundo —con un uso intensivo de carbón, petróleo y gas— ha propiciado la producción excesiva de gases invernadero que están provocando ya un calentamiento global de la atmósfera y de la hidrósfera, con la consiguiente alteración del equilibrio ecológico a nivel global (Lara-Rosano, 2016a).

Esto nos lleva a enunciar algunas características de la realidad compleja, que conviene tener en cuenta al tratar de resolver un problema social complejo:

- a) *La realidad es dialéctica y está constituida por la superposición de elementos y procesos contradictorios.* Así coexisten procesos deterministas con procesos estocásticos (movimientos planetarios vs. movimiento de partículas subatómicas o movimiento browniano), procesos reversibles y simétricos en el tiempo con procesos irreversibles (movimiento armónico ondulatorio vs. movimiento bajo fricción), procesos que perduran gracias a su equilibrio con procesos que perduran gracias a su no-equilibrio (formación de cristales vs. procesos fisiológicos), entidades estables con entidades inestables (isótopos no radiactivos vs. isótopos radiactivos).
- b) *Historicidad y dependencia de una realidad de su trayectoria evolutiva.* El estado de la realidad no surge espontáneamente en el presente en forma descontextualizada, sino que su estado depende de su historia por lo que su contexto histórico es esencial para su análisis y explicación, donde el término *histórico* es relativo a la escala de tiempo del problema específico del que se trate, y puede abarcar desde fracciones de segundo (por ejemplo, un error de cálculo en ciertas competencias deportivas) hasta milenios (por ejemplo, el carácter social de diferentes grupos étnicos). Por consiguiente, en el análisis adecuado de un problema debe contemplarse siempre la naturaleza del proceso histórico que le dio origen. Así, el fenómeno de la migración de indocumentados

mexicanos y centroamericanos hacia los Estados Unidos se debe analizar considerando su contexto histórico económico, social y político en las últimas décadas.

- c) *Contexto del problema.* La realidad se manifiesta en toda su complejidad, en la influencia del entorno en la génesis del problema, lo que equivale a decir que un problema no puede aislarse descontextualizándolo del entorno natural y social en el que surgió, sino que los diferentes aspectos de dicho entorno forman parte inseparable de dicho problema. Así, un problema de apariencia meramente técnica puede ser en realidad un problema en el que intervengan factores técnicos, administrativos, económicos, sociales y políticos. Tal es el caso, por ejemplo, de la construcción de un nuevo aeropuerto o de la constitución de una zona de reserva ecológica. Esta característica convierte al proceso de solución de problemas en un proceso complejo en el que generalmente deben intervenir varias áreas del conocimiento en forma interdisciplinaria (Ackoff, 1978).
- d) *Diversidad, interacción y autoorganización de agentes como elementos activos constitutivos de la realidad.* En la realidad actúa un gran número y diversidad de agentes biológicos, humanos y sociales a diferentes niveles y escalas, que interactúan unos con otros del mismo nivel según reglas locales, conformando redes de mundo pequeño en las que la posibilidad de interacción entre cualquier pareja de agentes del mismo nivel se puede dar a través de un número reducido de interacciones intermedias. Asimismo, también son posibles las interacciones con otros agentes de distinto nivel.
- e) *Aparición de propiedades y fenómenos emergentes.* Las interacciones entre agentes dan como resultado propiedades y fenómenos emergentes que ninguno de sus integrantes aislados tiene. Un ejemplo es una universidad conformada por diversos tipos de miembros: los alumnos, los profesores, los administradores, los ayudantes de profesor, los técnicos, los empleados administrativos, los departamentos, los consejos académicos, los investigadores, las facultades, que interactúan unos con otros a diferentes escalas, dando como resultado propiedades y fenómenos emergentes como el aprendizaje, los programas y planes de estudio, la investigación, la obtención de grados académicos, la capacitación para el trabajo, etcétera.
- f) *Procesos y funciones emergentes por autoorganización y coevolución.* Las interacciones entre agentes dan como resultado, por autoorganización y coevolución, el desempeño de funciones emergentes complejas. Un ejemplo es el cerebro, conformado por diversos tipos de células cerebrales que interactúan unas con otras a diferentes escalas, conformando

módulos funcionales que tienen a su cargo diversas funciones cognitivas como procesamiento de señales sensoriales, reconocimiento de patrones, memoria, inferencias, lenguaje y comunicación, producción y gestión de emociones, toma de decisiones, planeación y control de movimientos voluntarios, etcétera.

- g) *Presencia de factores teleológicos e intencionales en los agentes.* En la realidad actúan agentes animales, humanos y sociales que tienen motivos intencionales u objetivos que son complejos, dinámicos e incluso pueden ser contradictorios. Así, de acuerdo con Rosenblueth, Wiener y Bigelow (1943) en algunos sistemas biológicos animales y en los sistemas humanos y sociales no puede explicarse el comportamiento exclusivamente desde el punto de vista causal: es imprescindible considerar el componente teleológico o intencional, que funciona en un contexto de incertidumbre. Esto aumenta la complejidad.
- h) *Los procesos en la realidad son no lineales:* no hay proporcionalidad entre estímulos y respuestas. Pequeñas acciones pueden tener grandes efectos (efecto mariposa). Por ejemplo, el asesinato del archiduque Francisco Fernando (heredero de la corona del Imperio austrohúngaro en Sarajevo) por un estudiante bosnio en 1914 desata la primera Guerra Mundial, ocasionando con esto millones de muertos y la desintegración de grandes imperios del siglo XIX —como el austrohúngaro, el alemán, el ruso, el turco—, así como el debilitamiento del Imperio chino, y el debilitamiento y posterior desmembramiento de las potencias coloniales como Inglaterra, Francia, Holanda, Italia y Portugal. Asimismo, grandes eventos pueden tener resultados mínimos. Ejemplo: la Revolución mexicana (con su millón de muertos) no terminó con la desigualdad, la discriminación, la falta de democracia, ni la hegemonía del partido burgués oficial.
- i) *Prioridad de las interrelaciones sobre las partes.* Las propiedades emergentes de una entidad compleja no surgen de sus elementos sino de las interrelaciones entre sus elementos. Por tanto, no se puede comprender una entidad compleja descomponiéndola en partes porque al hacerlo se destruyen las interrelaciones que dan sentido al todo. Así, el funcionamiento de un organismo viviente o de un cerebro no se puede comprender desmembrándolo en partes, aplicando un enfoque anatómico reduccionista.
- j) *Dinamismo de las partes y de sus interrelaciones.* Tanto las relaciones entre las partes de una entidad compleja como las relaciones entre éstas y el todo son dinámicas y cambian con el tiempo. De hecho, provienen de la historia evolutiva tanto de las partes como del todo. Por tanto, la realidad compleja no puede comprenderse en forma sincrónica hacien-

do un corte en el tiempo, sino en forma diacrónica estudiando las transiciones entre sus fases, desde una perspectiva evolutiva.

- k) *Necesidad de un enfoque transdisciplinario*. La realidad se manifiesta en toda su complejidad en la génesis del problema, lo que equivale a decir que un problema no puede aislarse del entorno natural y social en el que surgió, sino que los diferentes aspectos de dicho entorno forman parte inseparable de dicho problema. Así, un problema de apariencia meramente técnica puede ser en realidad un problema en el que intervengan factores técnicos, administrativos, económicos, sociales y políticos. Tal es el caso, por ejemplo, de la construcción de un nuevo aeropuerto o de la constitución de una zona de reserva ecológica. “Esta característica convierte al proceso de solución de problemas en un proceso complejo, en el que generalmente deben intervenir varias áreas del conocimiento en forma transdisciplinaria” (Nicolescu, 1996). Lo anterior significa que para que un problema se pueda solucionar es necesario tomar en cuenta todos los aspectos que lo afectan relevantemente. Esto es, si el problema es de tal naturaleza que es afectado por factores económicos, sociales y políticos, la solución eficaz no puede contemplar sólo factores técnicos. Esto implica que el enfoque del problema deba ser totalizador y transdisciplinario, es decir, considerar el problema como una totalidad conformada por diferentes aspectos. Para lograr una colaboración transdisciplinaria, señala Nicolescu (1996), es necesario establecer conexiones y formalizar acuerdos entre diferentes campos del conocimiento, según el problema que se enfrente de la realidad; ello implica crear puentes entre las disciplinas que normalmente no se comunican. Esto no implica desdeñar o confrontar las investigaciones y logros de la ciencia unidisciplinaria, sino de aprovecharlos y potenciarlos de una novedosa manera: fusionar esos hallazgos y procedimientos de investigación bajo un principio de complementariedad con el propósito de comprender el mundo presente “en el cual uno de los imperativos es la unidad del conocimiento” (Nicolescu, 1996, p. 35).

¿Cuál es la ventaja de este enfoque transdisciplinario respecto de las otras formas conocidas de colaboración entre los campos disciplinarios o ciencias específicas? Para evitar incurrir en equívocos entre los conceptos de unidisciplina, pluridisciplina e interdisciplina, Nicolescu (1996) comienza por establecer el rango y alcance de la palabra *transdisciplina*. La partícula *trans* señala aquello que está al mismo tiempo entre, a través y más allá de las disciplinas o áreas de la ciencia conocida. Si la pluridisciplinaria implica analizar el objeto de estudio atribuido a un área específica desde múltiples disciplinas, y la interdisciplinaria se caracteriza por hacer la transferencia de métodos entre disci-

plinas, entonces la transdisciplina implica también esos enfoques (comprensión de un fenómeno desde múltiples teorías y transferencias metódicas), pero va más allá pues aspira a vencer la fragmentación del conocimiento y la hiperespecialización al posibilitar la generación de nuevas disciplinas.

- l) *Características dinámicas de la realidad: plasticidad, aprendizaje, adaptación y evolución.* En los agentes y sus colectivos, así como en sus interrelaciones, puede haber plasticidad, aprendizaje, adaptación y evolución. De acuerdo con Darwin, el proceso evolutivo tiene tres etapas: la etapa de variación, la etapa de selección y la etapa de retención.

En la etapa de variación se presenta una multiplicidad de individuos con diferentes características, pero que pertenecen a la misma especie. Esta diversidad de individuos tiene sus raíces en procesos de diferenciación a nivel de los cromosomas de cada individuo. Esta diferenciación puede darse por mutación aleatoria cuando hay cambios intempestivos en la estructura de uno o varios cromosomas, por la intervención de factores ambientales, en forma impredecible, como radiaciones. En otros casos, el cambio en los cromosomas se da por réplica cruzada, lo que significa que dos cromosomas pueden asociarse cambiando cada uno alguna de sus secuencias genéticas para adoptar la secuencia correspondiente del otro. La réplica cruzada es el mecanismo detrás de la variedad genética introducida por la reproducción sexual, donde los cromosomas del padre intercambian algunas de sus secuencias con los cromosomas de la madre, de manera que los hijos no son reproducciones idénticas de ninguno de los padres. Tanto la mutación aleatoria como la réplica cruzada son mecanismos generadores de variedad y eventual evolución, que se presentan en la genética de los seres biológicos pero que podemos encontrar también en la evolución de los sistemas sociales.

En la fase de selección, las especies generaron variaciones a nivel de organismos individuales por mutaciones, algunas de las cuales fueron favorables aumentando las probabilidades de supervivencia de los individuos mutantes y, por lo tanto, incrementando el éxito reproductivo de éstos en un entorno cambiante. Otras mutaciones no fueron favorables y los mutantes se extinguieron. Así, en la lucha por sobrevivir, las variaciones de los organismos biológicos fueron más o menos adaptadas a sus entornos, que incluían a otros organismos. Los organismos mejor adaptados sobrevivieron, se reprodujeron aumentando en número y seleccionándose mientras que los menos adaptados quedaron en desventaja y se extinguieron. Si las especies se encontraban separadas unas de otras por barreras geográficas, es probable que esas especies cambiaran en diferen-

tes formas, cada una resultando más y más adaptada a su entorno local. Eventualmente, las diferencias fueron tan grandes que las especies divergentes constituyeron nuevas especies.

En la fase de retención, los cambios adaptados al ambiente local fueron retenidos en la población al reproducirse los individuos y, en algún momento, las adaptaciones acumulativas resultaron en especies completamente nuevas, nuevas formas que no habían existido antes. De esta manera, las poblaciones de especies evolucionaron y coevolucionaron. El proceso descrito es una dinámica adaptativa porque la dinámica es hacia el estado más adaptado, y se producen formas mejor adaptadas que nunca habían existido previamente (Stacey, 2001). Lo que Darwin propone es un proceso formativo de variación, selección y retención, una forma de autoorganización a nivel de organismos de los cuales emergen nuevas especies.

Esta dinámica evolutiva tiene lugar también en otros planos de la realidad, por ejemplo, en el plano del desarrollo tecnológico donde las innovaciones van generando nuevas tecnologías que se confrontan compitiendo en el mercado, de manera que las mejor adaptadas, en términos de calidad, efectividad y costos son las que sobreviven y son la base de nuevas innovaciones, mientras que las demás se vuelven obsoletas, se dejan de producir y desaparecen. Por ejemplo, las tecnologías de grabación y reproducción musical empezaron inundando el mercado con discos de pasta de 78 r.p.m., que fueron sustituidos sucesivamente por discos de acetato de 33 1/3 r.p.m., discos de plástico de 45 r.p.m., cintas magnéticas de varios formatos, grabaciones digitales en discos compactos y grabaciones digitales en varios formatos, en dispositivos de memoria de estado sólido.

## El concepto de problemática

Toda acción modificadora de la realidad para adecuarla a lo deseado parte de la identificación de una divergencia entre lo deseado y lo real. Esta divergencia, que hemos definido como el *problema*, no es fácil identificarla dada la naturaleza compleja de la realidad. Lo único que se percibe es una situación que se califica como negativa, aunque no se haya definido exactamente en qué radica esa negatividad. Por ejemplo, se puede intuir que algo anda mal con la educación básica, pero sin que se sepa precisamente por qué.

Esta situación constituye, según Ackoff (1974), un embrollo (en inglés *mess*) complejo y difuso que por sí mismo no da pautas para emprender acciones que permitan salir de él. Es como cuando un paciente

percibe que algo le duele en el vientre, pero sin que sepa exactamente qué órgano. Este embrollo complejo y difuso, que se percibe directamente en una situación indeseable, es lo que se llama *problemática*.

De acuerdo con Kant (1998), ni la realidad en sí ni su entorno complejo pueden conocerse a través de la percepción ingenua y el sentido común. De la realidad y del entorno percibimos únicamente fenómenos que son sus manifestaciones externas. Por tanto, la esencia de la realidad debe ser descubierta mediante una actividad especial que es la investigación científica o filosófica. En la investigación debe emprenderse el conocimiento científico de la realidad mediante la construcción de un modelo conceptual de la misma que, rompiendo con el conocimiento de sentido común (ruptura epistemológica), permita comprender las relaciones entre sus elementos (Kosik, 1967).

Como toda experiencia directa, la problemática es sólo un conjunto de percepciones que para que tengan algún significado necesitan ser procesadas e interpretadas con arreglo a ciertos esquemas conceptuales. Para ello, es necesario construir un modelo conceptual de la porción de la realidad a la que se refiere la mencionada problemática, plasmando en él el conjunto de discrepancias que se establecen entre las características reales y las deseables de dicha realidad, y que dan lugar a un conjunto de problemas concretos y específicos.

Este proceso de construcción de un modelo conceptual de la realidad, a partir de la problemática percibida, constituye un proceso epistemológico o proceso de conocimiento que debe obedecer ciertas reglas para que sus resultados sean objetivos y no meros productos de la emotividad o los prejuicios, y no desemboquen en apreciaciones simplistas. Tal sería el caso, por ejemplo, si se afirma que la causa de la problemática de la educación primaria es la falta de infraestructura.

### Proceso epistemológico, paradigma y modelo conceptual

El proceso epistemológico, caracterizado por la construcción de un modelo conceptual de la realidad y la identificación de problemas concretos a partir de la problemática, necesita de un instrumento que permita interpretar dicha realidad a partir de una visión del mundo. Este instrumento es el paradigma (Kuhn, 1971). Por ejemplo, si consideramos el transporte público urbano como problemática, es posible identificar características indeseables tales como saturación en las horas pico, contaminación del ambiente, exceso de pasaje en los vehículos, falta de rutas adecuadas, falta de programación de las corridas, etc. Esta problemática no puede resol-



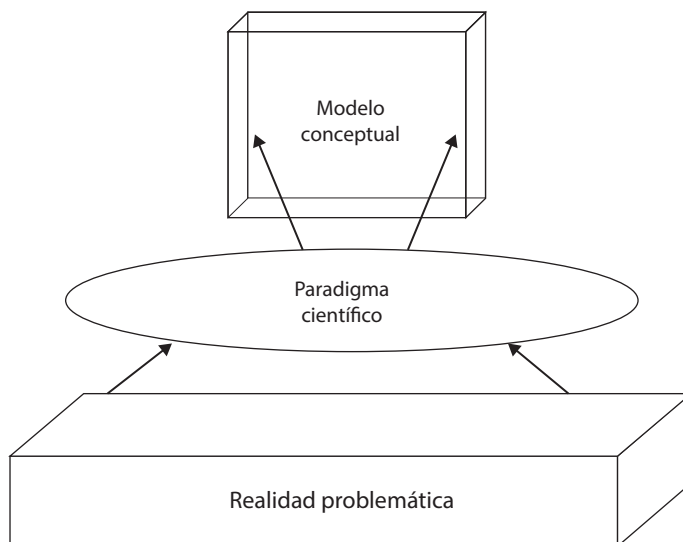
verse atacando cada uno de estos síntomas por separado, dado que éstos no son más que producto de factores comunes estrechamente vinculados.

Por ello, como primer paso, hay que construir un modelo conceptual del transporte público urbano donde estén ubicados estos factores intervinientes y sus interrelaciones, con el fin de definir los problemas concretos que hay que atacar.

La construcción de este modelo conceptual, que es el proceso epistemológico al que nos hemos referido, requiere de la intervención de un paradigma teórico o visión del mundo que sirva de guía para dicha construcción (Kuhn, 1971). Este paradigma es una teoría sobre la fracción de realidad que interesa, constituida por un conjunto de conceptos básicos o categorías, enlazados por principios básicos o leyes que definen relaciones entre ellos y que constituyen las relaciones teóricas del paradigma (Bravo, 1980). Ejemplos de estos paradigmas son, en la psicología: el paradigma freudiano, el paradigma conductista y el paradigma psicodinámico; en la mecánica: el paradigma newtoniano, el relativista y el cuántico; en la economía: el paradigma neoclásico y el marxista; en la sociología: el paradigma funcionalista, el marxista y el weberiano, etcétera.

El modelo conceptual de la realidad, resultado de una construcción teórica a través del paradigma (Bravo, 1980), constituye el objeto de estudio o constructo, que es el objeto donde ya se pueden definir los problemas específicos (figura II.3).

FIGURA II.3. Proceso epistemológico para la construcción del objeto de estudio





La justificación de esta metodología radica en la necesidad de superar el conocimiento vulgar o de sentido común y sustituirlo por un conocimiento rigurosamente científico de la realidad. Así, Durkheim (1967) afirma que el investigador debe luchar constantemente contra el conocimiento vulgar y los valores ideológicos que no tienen lugar en un discurso científico, y que el procedimiento de la construcción del objeto de estudio debe constituir una herramienta de toque en esa lucha. Así, por ejemplo, la experiencia vulgar de los sentidos indica que la tierra es plana y que el sol, con el resto de los astros, da vueltas a su alrededor una vez al día. Este conocimiento de sentido común predominó durante milenios, hasta que con el surgimiento de la ciencia y la metodología científica en el Renacimiento fue sustituido por un conocimiento científico, basado en el paradigma de Copérnico.

Por ello, como primer paso, en la investigación debe emprenderse el conocimiento científico de la realidad mediante la construcción de un modelo conceptual de la misma que, rompiendo con el conocimiento de sentido común que es lo que se llama ruptura epistemológica, permita comprender las relaciones entre los elementos de la realidad con el fin de definir los problemas concretos que hay que atacar.

La construcción de este modelo conceptual, que es el proceso epistemológico al que nos hemos referido, requiere de la intervención de paradigmas teóricos disciplinarios que abarquen los diferentes aspectos de la problemática como pueden ser los aspectos técnicos, sociales, económicos, administrativos, políticos, etc., que sirvan de guía para dicha construcción.

## Conceptos sistémicos fundamentales

El primer concepto en un análisis sistémico es el de un *individuo* (que no se puede dividir) que es la unidad de análisis básica que, para efectos del problema a resolver, no se puede dividir sin perder las propiedades características que tiene en el problema. Un individuo puede ser una célula en un ser viviente, un gen en un cromosoma, una persona en una familia, un municipio en una entidad federativa, etc., dependiendo del problema a resolver.

Un individuo se caracteriza por un conjunto de propiedades, cada una de las cuales asume un valor. Los valores pueden ser cualitativos (rojo, negro, vivo, bueno, regular) o cuantitativos (una micra, dos miligramos, 300 herz, 5 000 años luz). El conjunto de propiedades que caracterizan a un individuo, en un momento dado y en un contexto determi-

nado, constituyen su *estado* y las propiedades respectivas se denominan *variables de estado*.

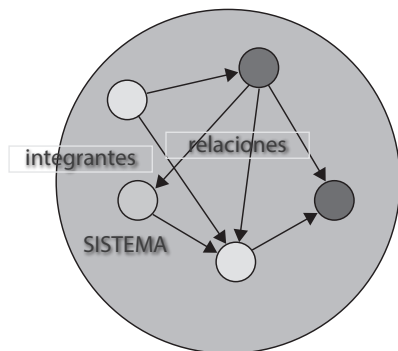
Un *sistema* es un conjunto de individuos, llamados integrantes, que cumplen tres condiciones (Ackoff, 1970).

- a) Los integrantes están interrelacionados.
- b) El comportamiento de cada integrante afecta el comportamiento del todo.
- c) La forma en que el comportamiento de cada integrante afecta el comportamiento del todo depende de al menos uno de los demás integrantes.

Un ejemplo muy ilustrativo es un equipo de futbol, que es un sistema porque es un conjunto de 11 jugadores que para funcionar adecuadamente deben estar interrelacionados. El comportamiento de cada jugador afecta el comportamiento de todo el equipo en un partido. Además, la forma en que el comportamiento de cada jugador afecta el desempeño del equipo en un partido, depende de los demás jugadores.

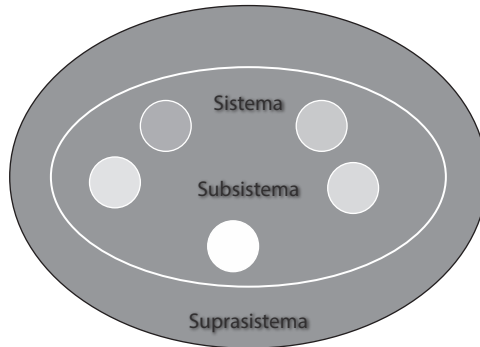
Otros ejemplos de sistemas son: una empresa, un ejército, el cuerpo de un ser humano vivo, el sistema solar, una ciudad, un ecosistema, una orquesta, una obra de teatro, un partido político, un gobierno municipal, un cártel de delincuencia organizada, la biosfera, etcétera.

FIGURA II.4. Sistema



Los sistemas no existen aislados sino que conforman una jerarquía sistémica. Dicho de otro modo, todo sistema es parte de un sistema mayor que lo comprende y que se denomina *suprasistema* y, a su vez, comprende como elementos a sistemas menores que constituyen sus *subsistemas*.

FIGURA II.5. Sistema, subsistemas y suprasistema



### Entorno o ambiente del sistema

Los sistemas afectan y son afectados por la realidad inmediata a ellos. Esta porción de la realidad que puede afectar al sistema o ser afectada por éste es lo que se denomina *entorno* o *ambiente* del sistema. Existen dos tipos de entorno: el *entorno activo*, que es la porción de la realidad que puede afectar al sistema, y el *entorno pasivo*, que es la porción de la realidad que puede ser afectada por el sistema.

El entorno activo del sistema influye sobre este mediante las *variables de entrada*. En cambio, el entorno pasivo es influido por las *variables de salida* del sistema. Por otra parte, los elementos del entorno no pueden pertenecer simultáneamente al entorno activo y al pasivo. Cuando existen elementos de la realidad que afectan y al mismo tiempo son afectados por el sistema es porque existen *vínculos de retroalimentación* en éste y en vez de ser considerados como parte del entorno, podrían ser parte del propio sistema dependiendo del problema.

### Variables sistémicas

Cada sistema tiene propiedades que lo describen en el marco de un problema. Estas propiedades se pueden referir al sistema mismo o al tipo de interrelaciones que establece con otros integrantes o con el entorno. Estas propiedades se llaman *variables sistémicas* porque tienen valores que pueden variar en el tiempo y caracterizan al sistema. Las propiedades de los sistemas pueden ser resultantes o emergentes. Una propiedad es *resultante* si es cualitativamente similar a las propiedades de los integrantes, y

si se puede derivar microanalizando el sistema en partes independientes tales que la propiedad sea la agregación de las propiedades de las partes; ejemplo: el colorido de una obra pictórica. Una propiedad es *emergente* si no se presenta en ninguno de los integrantes considerados aisladamente, sino que resulta de una organización específica de algunos de los integrantes en estados y contextos específicos; por ejemplo: la temperatura y la presión de un gas o la conciencia de un ser humano.

La definición de la cantidad y el tipo de variables sistémicas en un sistema dado es una de las fases críticas de su estudio porque de ella depende, en gran medida, el éxito de las siguientes etapas, así como su utilidad y confiabilidad.

A partir de la descripción de la problemática de datos estadísticos, de reportes y de estudios, se identifican las variables sistémicas —que juegan un papel en el sistema— mediante un taller participativo con los involucrados en el problema, y se registran en una base de datos relacional.

Estas variables pueden ser de tres tipos:

*Variables de estado*, que son aquéllas cuyos valores determinan el estado interno del sistema en un instante cualquiera, y en las que va comprendida la historia del propio sistema. Las variables de estado se llaman también *stocks* o variables de nivel porque reflejan la acumulación de una cierta magnitud a través de la historia del sistema, y además si el sistema se congelara o dejara de funcionar, las variables de estado mantendrían su valor. Por ello, las variables de estado constituyen la memoria del sistema, y cuando el sistema es expresable matemáticamente, el número de variables de estado determina el orden del sistema, o sea, el número de ecuaciones que describen el sistema.

El conjunto de valores de las variables de estado en un instante dado,  $t$ , conforman el estado del sistema en ese instante  $t$ . Un *sistema dinámico* es aquel cuyo estado cambia en el tiempo por diversos factores. Las variables de estado deben ser las mínimas necesarias y suficientes para efectuar una macrodescripción del sistema y de su comportamiento, que responda a nuestro problema. Por ejemplo, la población es una variable de estado en un sistema urbano ya que determina uno de sus aspectos en un momento dado, y es consecuencia de sus estados anteriores. Otras variables de estado en un sistema urbano serían, por ejemplo, la distribución de la población económicamente activa en ramas de actividad, la distribución espacial de las actividades económicas, la distribución del ingreso entre la población, el nivel educativo de la misma, las distintas variables ligadas a la descripción de la infraestructura urbana, el uso y el valor del suelo en distintas zonas, etcétera.

Las variables de estado constituyen el único medio para identificar un sistema dado. De ellas depende el tipo de efectos o salidas que produzca un sistema cuando se le suministran ciertos estímulos o entradas. El análisis de la dinámica de un sistema se basa en el comportamiento de sus variables de estado relevantes.

Una vez identificadas las variables de estado relevantes, la evaluación de los efectos de una intervención en el sistema en su dinámica tiene tres fases:

- 1) La determinación de los valores iniciales de las variables de estado relevantes al problema antes de comenzar la intervención.
- 2) La definición de los valores futuros deseables de las variables de estado cuando finalice el proceso de intervención.
- 3) La medición de los valores reales de dichas variables en el momento presente en que se hace la evaluación, para valorar los cambios alcanzados con la intervención respecto a los objetivos.

*Variables de entrada*, que son estímulos o irritaciones que le llegan al sistema desde su entorno activo o desde su suprasistema. Estas variables son de tres tipos: los *insumos*, que constituyen elementos materiales, energéticos o de información que serán transformados en productos por el sistema. Por ejemplo, en un sistema industrial los insumos están representados por las materias primas, el agua, el gas y otros combustibles, la energía eléctrica y las partes proporcionadas por otros proveedores. En un sistema educativo, los insumos están representados por el presupuesto anual, los contenidos educativos, los útiles escolares, los libros de texto, etc. Otro tipo de variables de entrada son las *entradas contingentes exógenas*, que provienen del entorno en forma aleatoria y actúan sobre el sistema afectando a sus variables de estado en alguna forma, sin que se pueda intervenir directamente sobre ellas.

Por ejemplo, las tasas de interés en Estados Unidos serían una variable contingente que podría afectar el funcionamiento de un sistema económico. Entre estas entradas exógenas están los accidentes y los factores contingentes que afectan la historia y el estado actual de un individuo (por ejemplo, descubrir que tiene cáncer). También están las amenazas y las oportunidades.

Las amenazas del entorno son factores provenientes del entorno que pueden dañar al sistema o al menos obstaculizarlo en el logro de sus fines. Por ejemplo, la aprobación de nuevas regulaciones fiscales puede constituir una amenaza para ciertos sectores exportadores o importadores.

Las oportunidades del entorno son acciones o propiedades de éste que pueden favorecer al sistema. Por ejemplo, la incorporación de México al Acuerdo Transpacífico puede representar una oportunidad para empresas manufactureras con productos baratos y de buena calidad.

Un tercer tipo de variables de entrada lo representan las *variables de control* que son aquellas susceptibles de ser manipuladas directamente, de manera intencional, con el fin de llevar al sistema a un estado predefinido. Por ejemplo, las inversiones públicas son una variable de control en un sistema urbano, ya que mediante ellas puede orientarse el desarrollo del sistema. Otros ejemplos de variables de control serían las leyes y reglamentos, los impuestos directos e indirectos, los subsidios, la propaganda, el control de la natalidad, etc.

Las salidas, reacciones o *variables de respuesta* son aquellas que, generadas en el sistema, son proyectadas al entorno como resultado de la interacción entre las variables de entrada y el estado del sistema. Las variables de respuesta se llaman también *variables de salida*, y tienen como característica fundamental la de ser observables y servir de base a la evaluación del desempeño del sistema. Por ejemplo, una variable de respuesta de un sistema económico sería el precio de los inmuebles, puesto que está determinado tanto por el estado actual del sistema como por la acción de variables de control, las tasas de interés y las reglamentaciones sobre uso del suelo. Otros ejemplos de variables de respuesta serían: el congestionamiento del tránsito, los precios de los servicios, la colaboración ciudadana, el número de estudiantes graduados, las publicaciones académicas, etcétera.

La definición de la cantidad y el tipo de variables sistémicas en un sistema dado es una de las fases críticas de su estudio porque de ella depende, en gran medida, el éxito de las siguientes etapas, así como su utilidad y confiabilidad. Así, por ejemplo, el estudio de un sistema económico que ignorara la distribución de la riqueza como variable de estado estaría dando una información muy pobre sobre la situación real de la economía.

FIGURA II.3. Sistema y variables sistémicas

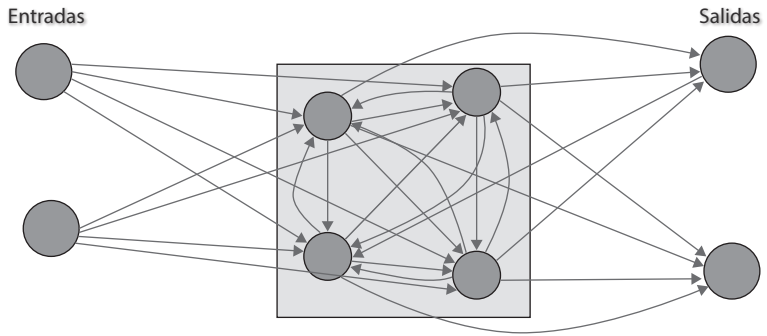
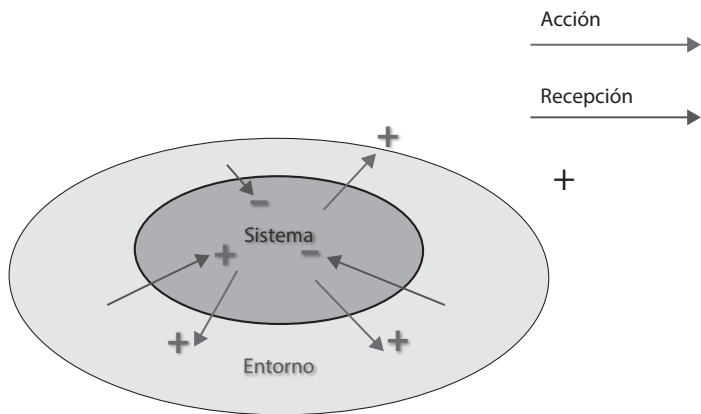


FIGURA II.4. Sistema abierto y entorno



## Análisis de la dinámica del sistema

Un *sistema dinámico* es un sistema cuyo comportamiento cambia en el tiempo y al que se le puede aplicar un estímulo o entrada y observar una respuesta.

La relación entre las entradas y salidas en un tiempo  $t \geq t_0$ , donde  $t_0$  es el tiempo inicial, depende del estado del sistema en el tiempo  $t$ . El proceso dinámico de un sistema a partir de un tiempo inicial  $t_0$  está constituido por el conjunto de entradas que ha recibido, el conjunto de respuestas que ha dado y el conjunto de estados que ha determinado las relaciones entre entradas y salidas. Por lo tanto, el estado de un sistema contiene toda la información relevante a la dinámica del sistema. Como se ha mencionado, el estado es descrito por una o más variables de estado. El número mínimo de variables de estado operativas para enfocar un problema dado es la *dimensionalidad* del sistema para ese problema.

El *análisis de la dinámica del sistema* tiene por objeto analizar la evolución del sistema en el pasado a partir de un tiempo inicial  $t_0$ , con el fin de conocer los determinantes de su evolución temporal y poder estimar sus posibilidades de comportamiento futuro, considerando diversos escenarios de su entorno.

Existen dos enfoques para analizar la dinámica del sistema:

- a) El enfoque determinista, que considera que en un sistema para todo  $t > t_0$  hay una única salida posible que es función del estado presente y de la entrada, y que existe una *ley de evolución* que transforma el estado presente en un tiempo posterior, en un único estado determinado.
- b) El enfoque estocástico es aquel en el que se considera que tanto la salida como la secuencia de estados a partir de un estado inicial son inciertas, por lo que se requiere un enfoque probabilista para su análisis.

En esta sección nos enfocaremos en sistemas dinámicos deterministas. Los sistemas dinámicos deterministas deben cumplir las siguientes condiciones:

- a) Para todo  $t > t_0$  hay un único vector de salida  $y(t)$

$$y(t) = f[t, x(t), u(t)] \quad (1)$$

que es función del tiempo  $t$ , del estado  $x(t)$  y de la entrada  $u(t)$

- b) La ley de evolución o trayectoria del sistema



$$x(t) = \Phi [t, t_0, x_0(t_0), u(t)] \quad (2)$$

que transforma un estado inicial  $x_0(t_0)$ , en un único estado  $x(t)$  en un tiempo posterior  $t > t_0$

Como consecuencia de 2, la trayectoria en sentido positivo del tiempo es única.

Si el tiempo es continuo y las variables de estado son derivables, la ley de evolución constituye un flujo o campo vectorial, que se expresa por un conjunto de *ecuaciones diferenciales acopladas*, que se pueden expresar vectorialmente como:

$$d x/dt = f(x)$$

Si el tiempo es discreto, la ley de evolución constituye un mapa, que se expresa por un conjunto de ecuaciones en diferencias acopladas, que son ecuaciones algebraicas

$$X_{n+1} = F(X_n, X_{n-1}, \dots, X_0)$$

La trayectoria de estados puede ser resultado de dos factores:

- a) La dinámica interna del sistema que transforma el estado presente en un nuevo estado.
- b) La influencia de factores exógenos.

Cuando la trayectoria de estados no depende de factores exógenos, las ecuaciones diferenciales que la representan son homogéneas.

$$d x/dt - f(x) = 0$$

Cuando existe influencia de factores exógenos  $u(t)$ , las ecuaciones diferenciales ya no son homogéneas, sino que tienen un término independiente que expresa la influencia de tales factores.

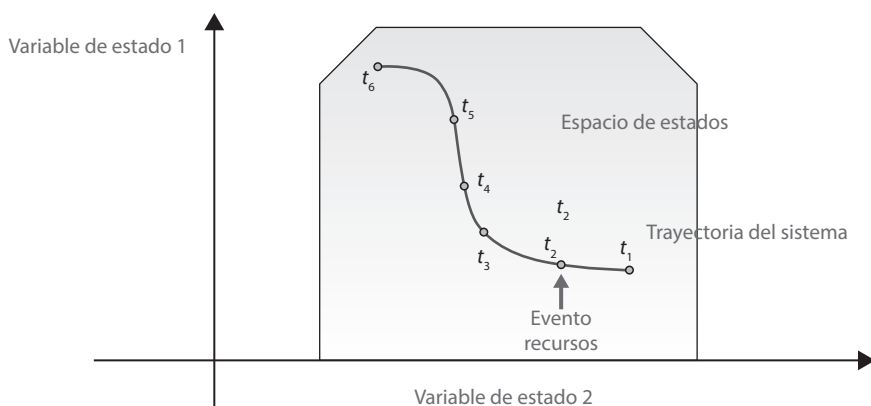
$$d x/dt - f(x) = B [u(t), t]$$

## Espacio de estados del sistema

En todo problema práctico, las variables de estado o ciertas funciones de éstas —como sus derivadas temporales o de otro tipo— se ven restringidas a tomar valores dentro de cierto rango. La determinación de estas restricciones involucra un estudio cuidadoso del sistema y de las interac-

ciones con su medio. El espacio de estados de un sistema es una región cuyas dimensiones son las variables de estado, constituido por todos los estados factibles que puede ocupar el sistema. La determinación del espacio de estados factibles del sistema es esencial para la solución de problemas, porque éste define los límites y alcances de las soluciones factibles y, por tanto, las estrategias y heurísticas más apropiadas para la búsqueda eficiente de soluciones operativas a los problemas planteados. Así, en el sistema educativo, restricciones que actúan sobre el espacio de estados pudieran ser, entre otras, la infraestructura disponible, el número de maestros, los recursos financieros, etcétera.

FIGURA II.5. Espacio de estados y dinámica del sistema



En la figura II.5 se aprecia un polígono de estados de un sistema de dos variables que son los dos ejes coordenados. La variable 1 asume valores desde el eje horizontal hasta un eje horizontal paralelo, exceptuando en las esquinas superiores de espacio. La variable 2 asume valores entre los dos límites verticales del polígono. Todos los puntos en el interior del polígono son estados factibles del sistema que pueden ser ocupados por el mismo. En la figura se consideran tiempos  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$ ,  $t_4$ ,  $t_5$  y  $t_6$ , entre los cuales transcurre el tiempo, por ejemplo, en un periodo de un mes. A medida que el tiempo pasa, las variables de estado van asumiendo nuevos valores indicados por las respectivas coordenadas de los puntos  $t_1$  a  $t_6$ . Interpolando una línea curva continua entre los puntos, resulta una curva que es la trayectoria del sistema en su espacio de estados desde el instante inicial  $t_1$ , hasta el instante final  $t_6$ , al cabo de cinco meses. De la gráfica podríamos derivar la ecuación de la trayectoria de este sistema. Por otro

lado, suponemos que el operador del sistema no está de acuerdo con la trayectoria de  $t_1$  a  $t_2$  y decide intervenir en el sistema agregando cierto tipo de recursos en el instante  $t_2$ , representado por una flecha. El resultado es que el sistema reacciona aumentando la pendiente de su trayectoria a partir de  $t_2$ .

Con fines didácticos hemos puesto como ejemplo un sistema con dos variables de estado, representable en un plano de dos dimensiones. Como en los sistemas complejos, el número de variables de estado puede llegar a varias centenas o miles de variables. La representación gráfica del espacio de estados y la trayectoria del sistema es imposible, pero el tratamiento puede llevarse a cabo en forma matemática, con los equipos de computación actuales.

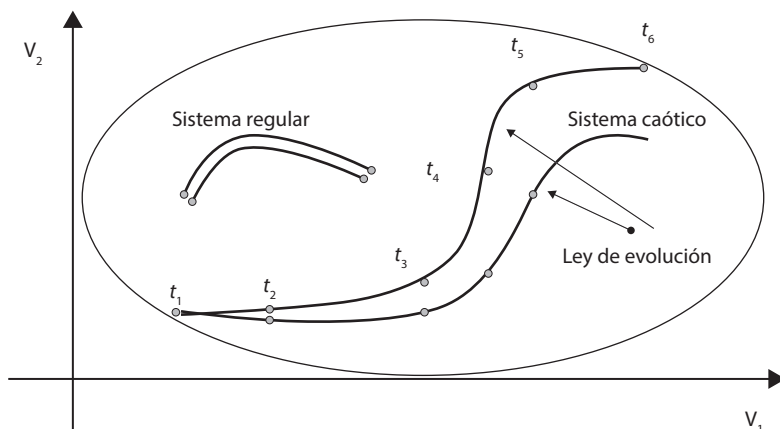
El concepto de *espacio de estados*, también llamado en física *espacio de fase*, es un recurso conceptual fundamental para el análisis de sistemas complejos, como se verá más adelante.

## Sistemas regulares y sistemas caóticos

Un sistema determinista puede ser regular o caótico dependiendo del comportamiento de grupos de trayectorias posibles. Un sistema es regular si trayectorias cercanas permanecen próximas a medida que evolucionan. Un sistema es caótico si trayectorias inicialmente cercanas se separan con el tiempo a una tasa exponencial. La divergencia exponencial vuelve a los procesos caóticos impredecibles, a la larga, porque éstos amplifican pequeños errores en las condiciones iniciales. En los sistemas caóticos dinámicos, al ser deterministas, la misma condición inicial produce siempre la misma trayectoria. Sin embargo, condiciones iniciales similares no dan por resultado trayectorias similares.

En los sistemas caóticos, los experimentos repetidos acumulan información sobre ellos porque las pequeñas desviaciones, en condiciones iniciales, se vuelven observables con el tiempo. Esto no sucede en sistemas regulares.

FIGURA II.6. Sistemas regulares y sistemas caóticos

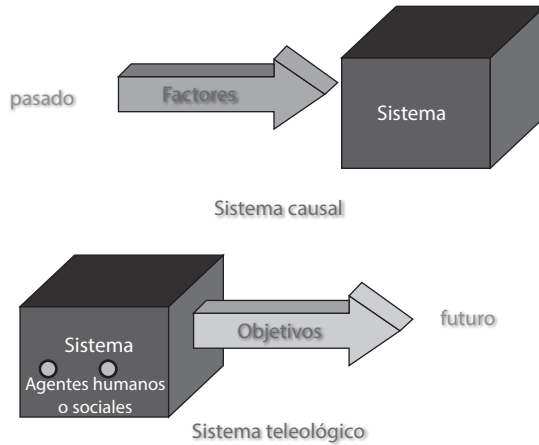


### Sistemas causales y sistemas teleológicos

En el análisis de sistemas conviene a veces explicar el funcionamiento de un sistema como consecuencia de un conjunto de factores, eventos o causas situado en el pasado. En este caso se está considerando el sistema como un *sistema causal* y el enfoque utilizado es un enfoque causal o de productor-producto (Singer, 1959; Ackoff, 1974).

En otras ocasiones, cuando intervienen agentes humanos y sociales en el sistema, conviene explicar el funcionamiento del sistema de acuerdo con un conjunto de intenciones, objetivos y metas de estos agentes, que tienen en el presente pero que están dirigidas a lograr un futuro deseado, por ejemplo, cuando se explican los esfuerzos, sacrificios y trabajo de un grupo de estudiantes de doctorado, por el objetivo que tienen de obtener el grado y de lograr un futuro deseado como investigadores. El sistema se considera entonces como un sistema intencional, propositivo o teleológico. Este enfoque se denomina teleológico (Ackoff, 1974).

FIGURA II.7. Sistemas causales y sistemas teleológicos



En los sistemas complejos que comprenden integrantes teleológicos es necesario aplicar conjuntamente el enfoque causal y el enfoque teleológico, para poder tomar en cuenta tanto la influencia de mecanismos causales como de mecanismos teleológicos y anticipatorios en el comportamiento del sistema y de sus integrantes. Los sistemas humanos y sociales tienen tanto aspectos causales como, necesariamente, aspectos teleológicos (Rosenblueth, Wiener y Bigelow, 1943).



### III. EL ENFOQUE DE LOS SISTEMAS COMPLEJOS

Es un nuevo enfoque de la ciencia que estudia cómo resolver los problemas de complejidad organizada (Weaver, 1948), sugiriendo una perspectiva diferente sobre la relación entre los fenómenos sociales a diferentes niveles.

Desde esta perspectiva, casi todos los fenómenos sociales pueden entenderse como fenómenos emergentes que provienen de un sistema de interacciones de elementos de nivel inferior (véase Sawye, 2005; Haken, 1978; Holland, 1995; Johnson, 2001; Schuster, 1984; Strogatz, 2003).

Un sistema complejo es una estructura de individuos interrelacionados a varios niveles. Las interrelaciones a todos los niveles son no lineales, dinámicas (cambian con el tiempo) y muchas veces circulares, llamadas retroalimentaciones. Un sistema complejo tiene sus componentes interactuando activamente con su entorno, manifestando procesos de intercambio continuo de energía e información entre los mismos componentes y con el entorno, con sus componentes fuera del equilibrio, y comportándose —en el caso de componentes humanos y sociales— tanto con base en factores del pasado como con base en sus objetivos orientados hacia el futuro.

Un sistema social tiene las siguientes características: es una totalidad compleja con múltiples y diferentes relaciones de retroalimentación entre sus integrantes. Por lo tanto, en un sistema social un fragmento de la realidad no puede ser aislado para actuar sólo sobre él. Cada integrante, a su vez, puede ser un sistema complejo en sí, con capacidad de cambiar y adaptarse, interactivamente, tanto con los otros elementos como con el entorno.

Los integrantes de un sistema social complejo son agentes humanos y sociales que tienen motivos intencionales u objetivos que son diversos y pueden ser contradictorios entre sí; son dinámicos porque cambian con el tiempo y tienen prioridades diferentes. Los integrantes biológicos, humanos y sociales presentan procesos de autoorganización y producen propiedades emergentes en el sistema, que surgen a partir de las interacciones entre ellos. Los integrantes al actuar modifican la realidad y, por retroalimentación, son modificados a su vez por ésta. Los integrantes biológicos, psíquicos y sociales son producto de una dinámica evolutiva y presentan funciones de percepción, homeostasis, acción, adaptación y resiliencia, así como estados de caos y horizontes de predictibilidad.

## Regiones en el espacio de estados

Hay sistemas complejos cuyo espacio de estados está dividido en regiones:

*I.* Regiones de estabilidad puntual, donde el estado del sistema permanece en equilibrio por un tiempo, por ejemplo, una piedra en reposo.

*II.* Regiones de estabilidad periódica, donde el estado del sistema cambia de un punto a otro en forma periódica, deteniéndose en cada punto por un tiempo. Por ejemplo, en la psicosis maniaco-depresiva, el individuo experimenta una temporada de extraordinaria alegría, dinamismo y euforia y después una fase de depresión intensa en la cual se siente solo, abandonado e incapaz de hacer nada, para luego regresar a su fase maniaca.

*III.* Regiones de caos, donde el estado del sistema está en un desequilibrio permanente, cambiando de un punto a otro sin ningún patrón y sin poderse predecir su futura trayectoria.

*IV.* Regiones al borde del caos, en las que el sistema puede estar al borde de una crisis en la que puede caer, pero que tiene la suficiente estabilidad para almacenar y procesar información que puede servirle para estimular su creatividad y encontrar nuevas soluciones innovadoras a sus problemas. De hecho, todo animal viviente se encuentra en un estado al borde del caos, donde tiene que buscar agua, alimento y protegerse él y su prole de los depredadores.

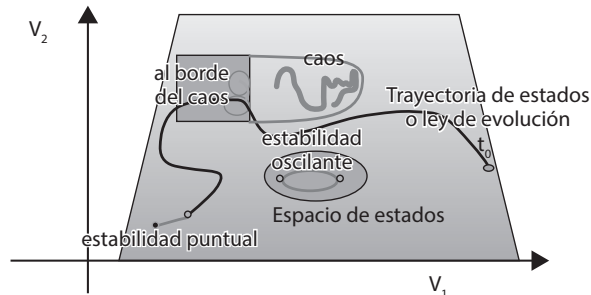
El caos, con sus trayectorias impredecibles, es la fuente de creatividad y variedad en la naturaleza y en la dinámica social. El caos se refiere a los sistemas y no a sus integrantes. Lo impredecible, lo diverso, lo variado crea la novedad y la novedad es la autora de un nuevo orden, al dar soluciones nuevas a problemas complejos. Lo impredecible viene en dos formas: lo probabilista, que es aleatorio y lo caótico, que es determinista. Un sistema complejo al borde del caos es más estable y predecible que uno caótico. Aunque está en el borde del caos, tiene suficiente estabilidad para poseer memoria y suficiente dinamismo para procesar esa información. Este balance entre orden y caos le permite la habilidad para reproducirse, para cambiar en una manera ordenada y para autoorganizarse sin intervención externa. Su complejidad es un estado híbrido que está entre la estabilidad y el caos.

Todos los seres vivos, como los sistemas sociales, son sistemas complejos al borde del caos por lo cual, a veces, se pueden comportar caóticamente. Como todo sistema al borde del caos, los sistemas sociales y biológicos llevan información sobre su entorno y su pasado. Asimismo, su flexibilidad hace que puedan aprender de su experiencia y ajustar su



comportamiento con base en ella. Tienen, además, la habilidad de anticipar su futuro e intentar manipularlo.

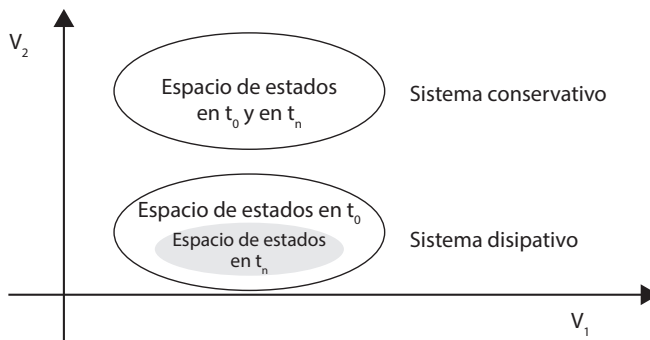
FIGURA III.1. Regiones en el espacio de estados



### Sistemas conservativos y sistemas disipativos

Un sistema dinámico determinista puede ser conservativo o disipativo. Un sistema dinámico es conservativo si su dinámica preserva el volumen de su espacio de estados. Un sistema dinámico es disipativo si su dinámica lo conduce a una contracción del volumen de su espacio de estados. Por ejemplo, el ser humano es un sistema dinámico disipativo, porque al envejecer se contrae el volumen de su espacio de estados y va perdiendo las habilidades que tenía cuando era joven. Los sistemas conservativos o disipativos pueden exhibir comportamiento regular o caótico.

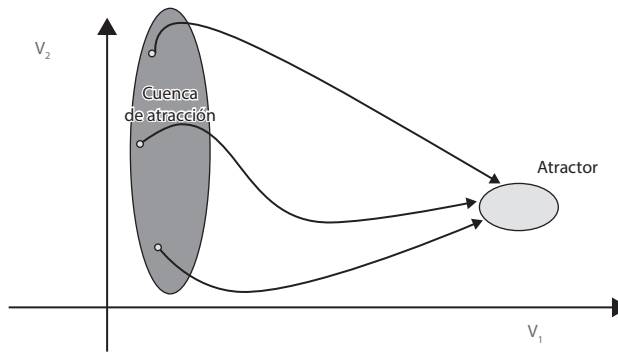
FIGURA III.2. Sistemas conservativos y sistemas disipativos



## Atractores y cuencas de atracción

Si las trayectorias de un sistema que provienen de diferentes estados iniciales convergen en una región limitada del espacio de estados, ésta se llama un *atractor*, y los estados iniciales de las trayectorias convergentes forman la *cuenca de atracción*. Por ejemplo, estudiar una maestría puede ser un atractor para un joven, ya sea que provenga de una universidad pública, de una universidad privada o de un politécnico.

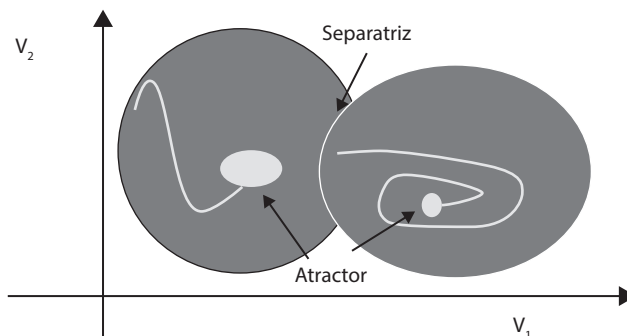
FIGURA III.3. Cuenca de atracción y atractor



Los sistemas que llegan a un atractor permanecen en él para siempre, a menos que intervengan fluctuaciones del entorno, por ejemplo, si fallece el padre del estudiante y éste tiene que abandonar sus estudios de maestría para trabajar y mantener a su madre y hermanos.

Un sistema dinámico puede tener dos o más atractores, cuyas cuencas de atracción están separadas por fronteras llamadas *separatrices*.

FIGURA III.4. Cuencas de atracción, atractores y separatrices



Por ejemplo, si un estudiante radica en la Ciudad de México, su maestría la puede hacer en la UNAM; pero si radica en el estado de Jalisco, el atractor de sus estudios de maestría puede estar en la Universidad de Guadalajara, y habría una separatriz apartando las regiones de donde proviene para preferir dónde realizar su maestría.

### Atractores al borde del caos

En las regiones al borde del caos pueden existir o construirse atractores. Estos atractores tienen la particularidad de que los estados situados en ellos son suficientemente estables para guardar información, pero lo suficientemente dinámicos para procesar esa información y utilizarla generando cambios. Así, los sistemas que están en el borde del caos, como los organismos vivos y los sistemas sociales, mapean su entorno conforme a su experiencia y construyen atractores de su conducta, por ejemplo, los animales para protegerse de sus depredadores construyen atractores al borde del caos, eligiendo escondites difíciles de localizar como sus guaridas.

### Estados atractores inerciales

Cuando en un entorno un sistema con memoria que está en un cierto estado tiene éxito en sobrevivir, mapea su entorno conforme a su experiencia y construye un atractor de su conducta alrededor de ese particular estado, que resulta un atractor inercial que aprende a evocar y en el que se asienta. Por ejemplo, un joven que terminó su bachillerato, pero que no le atrae el estudio, puede encontrar un empleo de promotor o vendedor con ingresos que le satisfagan para vivir tranquilo, sin tener que esforzarse en continuar su preparación. Este asentamiento inercial tiene cuatro características: *a*) ahorro en el costo en infraestructura de un cambio de estado, *b*) ahorro del costo de la curva de aprendizaje para cambiarse y dominar un nuevo estado, *c*) conservar vínculos exitosos con el entorno, *d*) la comodidad de un *statu quo* estable. Aunque a veces la inercia garantiza la supervivencia y el crecimiento, la inercia puede conducir a una falta de adaptación a cambios ambientales y a un deterioro de la aptitud del sistema.

## Atractores extraños y atractores complejos

Los atractores en los cuales los sistemas dinámicos se comportan caóticamente se llaman *atractores extraños*. El atractor extraño abarca una región del espacio de estados, de dimensión fractal, es decir, una dimensión fraccionaria hacia donde puede ser atraída la trayectoria de un sistema caótico, de manera determinista pero impredecible.

El atractor extraño es un conjunto invariante. Una trayectoria que empiece en él, permanece en él para todo tiempo, si no hay fuertes fluctuaciones del entorno. Asimismo, el atractor extraño puede contener dos o más puntos de equilibrio. En estos casos, las trayectorias en el espacio de estados se ven atraídas a estos puntos de equilibrio, orbitando a su alrededor pero sin caer en ellos, sino escapándose sucesivamente hacia las cuencas de los puntos de equilibrio restantes, en una forma irregular y no repetitiva. El tener atractores extraños es una propiedad emergente de la complejidad caótica.

Los bucles, giros y cambios de trayectoria en esos atractores extraños, señala Sardar (Abrams, 2006), corresponden a la periodicidad, a las torsiones, al cambio, al espacio vacío e incluso a la imposibilidad física de maniobra del sistema descrito.

La construcción de esta teoría debe bastante a muchas otras personalidades como David Ruelle (Ruelle y Takens, 1971) con su estudio de las turbulencias, Robert May (May, 1976) con su estudio de la fluctuación de las poblaciones animales, Feigenbaum y su demostración matemática de la universalidad caótica (Feigenbaum, 1978), y, sobre todo, al químico belga Ilya Prigogine (Prigogine y Stengers, 1984).

Los atractores en sistemas complejos comparten características de atractores extraños y periódicos: el comportamiento del sistema es en un sentido repetitivo y predecible pero cada día es diferente y sujeto a sorpresas. El atractor complejo tiene una cuenca de atracción extensa; es pequeño en el sentido de que involucra un rango limitado de comportamientos; está separado de otros atractores por separatrices difíciles de cruzar; tiene acceso a un número limitado de otros atractores; es estable a las fluctuaciones; no es exageradamente sensible a las condiciones iniciales; es considerablemente estable, capaz de portar información, pero ligeramente inestable como para permitir el uso dinámico de esta información. Los atractores de los sistemas sociales son atractores complejos. Un ejemplo serían los rituales religiosos en torno al santo patrón de las comunidades campesinas, que se repiten año con año, aunque cada año es diferente y sujeto a sorpresas.

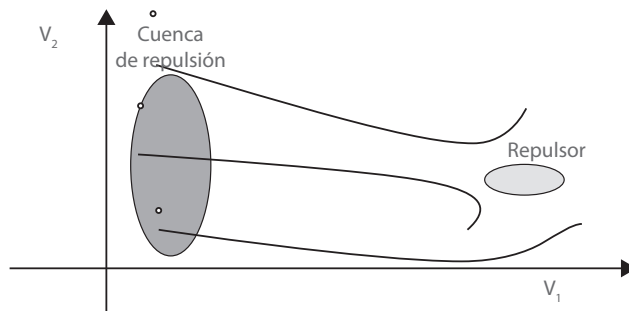
## Solitones sistémicos

Un fenómeno dinámico particularmente importante, y que se da por la construcción colectiva de atractores simples de baja dimensionalidad, es el conjunto de los solitones sistémicos. Estos fenómenos de conducta colectiva aparecen como una singularidad en el comportamiento sistémico, y son función de dinámicas no lineales que se sincronizan entre los integrantes de un sistema. Se caracterizan por ser dinámicamente estables, durante un cierto tiempo, y se pueden reproducir y trasladar a otros sistemas. Por ejemplo, el movimiento de 1968 en Francia, que se trasladó posteriormente a otros países incluyendo México, Estados Unidos y diversos países europeos. Para la producción de solitones sociales no es necesario el contacto físico, sino que basta la comunicación simbólica, a través del lenguaje oral o escrito, y las comunicaciones por medio de las redes sociales como Facebook, Twitter, etc. Otros casos de solitones sociales son la ola en un partido de fútbol, las alzas y caídas de las bolsas de valores, los levantamientos populares como la primavera árabe, movimientos religiosos fundamentalistas y terroristas, etcétera.

## Repulsores y cuenca de repulsión

Si las trayectorias de los estados (de un sistema) que provienen de diferentes estados iniciales, por su propia dinámica interna se apartan de una región limitada del espacio de estados, ésta se llama un *repulsor*, y los estados iniciales de las trayectorias convergentes forman la *cuenca de repulsión*.

FIGURA III.5. Repulsores y cuenca de repulsión



## Aptitud de un sistema en un entorno

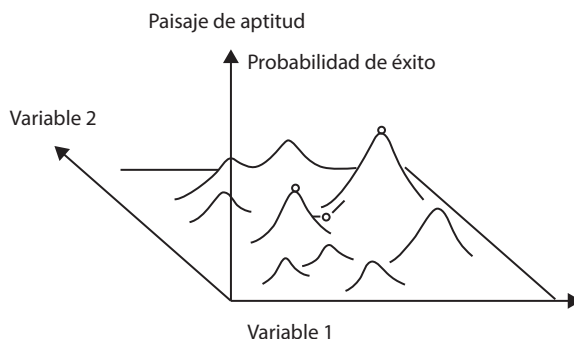
La *aptitud de un sistema* en un entorno dado es la probabilidad de éxito de un sistema de sobrevivir y cumplir con sus funciones en ese entorno. La aptitud depende entonces tanto del estado del sistema como del estado de cada uno de los sistemas del entorno con los que interacciona (Kauffman, 1993).

Para cada estado del entorno se puede definir entonces una aptitud como una función de densidad de probabilidad de éxito, que recibe también el nombre de *paisaje de aptitud* porque, a nivel de un espacio de estados del sistema de dos dimensiones, tendría una forma más o menos rugosa, como la superficie terrestre, con picos que significan una mayor aptitud o probabilidad de éxito en el entorno dado, y con unas depresiones que significan una menor aptitud en ese entorno, según los valores de las variables de estado del sistema.

Los picos en un paisaje de aptitud no sólo varían en altura, sino en picudez. Algunos de ellos son tan picudos que el menor cambio, en el estado del sistema, lleva a una modificación dramática en la aptitud del mismo. En cambio, otros son suaves y tendidos porque puede haber transformaciones considerables en las variables de estado, sin que se altere mucho la aptitud del sistema.

La rugosidad del paisaje de aptitud depende del número de integrantes de un sistema y de su grado de interacción. La evolución se puede definir entonces como la búsqueda de picos de aptitud óptima en un paisaje de aptitud.

FIGURA III.6. Aptitud de un sistema en un entorno dado



Los sistemas maduros han llegado a una aptitud tan alta en entornos moderadamente cambiantes que el cambio no les favorece porque ya han

agotado sus opciones de mayor aptitud, y con las modificaciones pueden perder aptitud. En cambio, a los sistemas inmaduros les favorece la mudanza porque tienen paisajes de aptitud muy rugosos, con lo cual el cambio es productivo y rápido durante la etapa de desarrollo. Además, aún tienen numerosos estados posibles de mayor aptitud frente a ellos, por lo que se pueden beneficiar con la transformación. Los sistemas fuertemente acoplados o que tienen entornos muy rugosos son más sensibles al cambio que los sistemas con acoplamiento ligero.

Un sistema apto está apoyado de manera significativa por recursos ambientales, ha acumulado suficientes recursos internos y es parte de una red de sistemas aptos interdependientes. Los integrantes de sistemas aptos están interrelacionados de tal manera que pueden disipar el impacto de las fluctuaciones. Cada integrante puede absorber y neutralizar una parte de las fluctuaciones. Así, un sistema puede ser apto porque es tan grande y complejo que los cambios que afectarían a otros sistemas apenas son percibidos por él. De este modo, por ejemplo, un consorcio corporativo puede enfrentar con éxito una crisis en el entorno financiero, que tendría un impacto considerable en medianas o pequeñas empresas. En entornos que cambian radical pero ocasionalmente, la aptitud de todos los sistemas cae, pero más rápido caen los que tienen un fuerte acoplamiento interno y una administración centralizada. Los sistemas pueden resistir los cambios en cascada si tienen suficientes recursos que les permitan absorber el cambio. Estos recursos los pueden generar a través de la interacción con otros sistemas.

### Patrones de comportamiento de un sistema

Los patrones de comportamiento de un sistema son conductas autoorganizadas y previsibles, que surgen espontáneamente en forma emergente y que son el resultado de las interacciones entre el sistema y otros sistemas dados. El tipo de patrón que se desarrolla depende de cómo está organizado el sistema y de quién interactúa con quién; de qué cosas puede hacer un sistema y de cómo este conjunto de acciones se relaciona con la forma en que el sistema se autoorganiza. Por ejemplo, el patrón de comportamiento de un joven con las mujeres; la existencia de dunas de arena en la playa o en el desierto; la formación de olas en la costa; la integración de cardúmenes y de parvadas. En el desarrollo embrionario, el DNA prescribe a cada célula cómo debe relacionarse con otras células. En el plano económico, los mercados son patrones autoorganizados por las relaciones entre compradores y vendedores. En el plano social, las organizacio-

nes no gubernamentales (ONG) resultan de la autoorganización de grupos sociales de toda índole.

En ciencias de la complejidad, los patrones autoorganizados se estudian mediante modelos computacionales de activación local e inhibición a distancia. Un tipo de modelos muy efectivos son los autómatas celulares, en los que la posición de cada integrante sólo depende de sus vecinos.

## Autoorganización, memoria y atractores

La información sobre cierto estímulo del entorno, la reacción del sistema a este estímulo y el éxito o fracaso de esta reacción dan origen al aprendizaje que es el establecimiento de un atractor o repulsor de baja dimensión, que se refiere a un par de variables de estado y que actúa sobre el sistema como memoria del episodio, a la cual se puede recurrir en el futuro para orientar la trayectoria del sistema. Este aprendizaje es una forma de autoorganización. La estabilidad de estos atractores y repulsores permite la retención de la información, por lo tanto, la memoria.

Los distintos atractores o repulsores de baja dimensión conforman diferentes redes sistémicas que mapean diferentes aspectos del entorno. Estas pequeñas redes se interrelacionan en una red compleja: la memoria, que es la base para comportamientos exitosos, basados en la experiencia.

Para facilitar el análisis de la dinámica de un sistema complejo se introducirá la teoría cibernética de los efectos, enunciada por Pierre de Latil (1958).

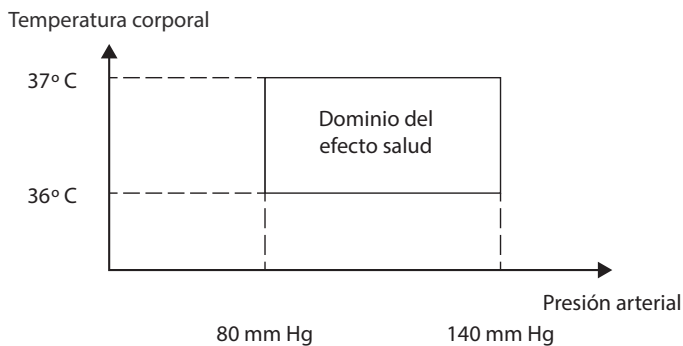
## La teoría cibernética de los efectos (De Latil, 1958)

El logro de un objetivo por parte de un sistema involucra la producción de un efecto por el sistema. Todo efecto depende de varias condiciones llamadas sus *factores*. Por tanto, un efecto es producido por la sinergia del conjunto de factores que constituyen las condiciones necesarias y suficientes para producir el efecto. Los factores pueden ser causales y tener una existencia real e histórica, o intencionales (teleológicos) y proponer una posibilidad futura.



*Dominio de un efecto* (De Latil, 1958) es un espacio de tantas dimensiones como factores tiene el efecto, y se define como las diferentes combinaciones de valores que deben tomar los factores para que produzcan el efecto. Por ejemplo, si consideramos simplistamente —como factores del efecto salud— la temperatura corporal y la presión arterial, para que haya salud la temperatura corporal debe estar entre 36° y 37°, en tanto que la presión arterial sistólica debe estar entre 80 mm de mercurio y 140 mm de mercurio. El dominio del efecto se puede entonces representar para estas variables como lo muestra la figura IV.7:

FIGURA III.7. Dominio del efecto salud



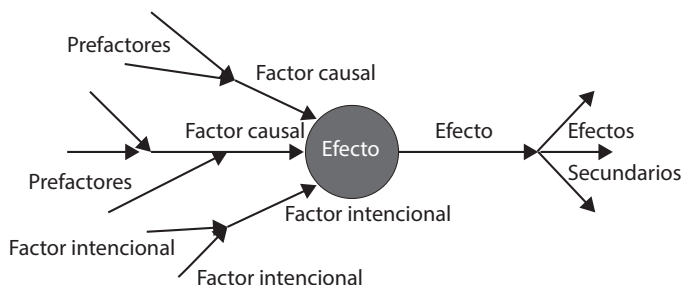
Cuando algún valor de los factores es aleatorio, hay contingencia (De Latil, 1958). Las contingencias pueden provenir del interior del sistema, del supra sistema o del entorno, es decir, del exterior. Cuando no hay aleatoriedad en los factores, hay determinismo.

En los sistemas complejos, el hombre nunca puede tener la seguridad de haber determinado un efecto, porque son tantos los factores que intervienen en la producción de un efecto que uno o varios pueden escaparse al control humano por contingencias o por aumento en la entropía, y salirse del dominio del efecto.

La relación entre factores y efectos se puede representar por un diagrama de Ichikawa, concebido por Kaoru Ishikawa en 1953. Este diagrama causal es la representación gráfica de las relaciones múltiples de

causa-efecto entre los diversos factores que intervienen como entradas en un proceso, produciendo uno o varios efectos como salidas o *outputs* de un sistema.

FIGURA III.8. Diagrama de Ichikawa de un efecto



La sustracción del efecto a las contingencias del entorno se logra mediante la adaptación del sistema por homeostasis, que es un mecanismo de retroalimentación que tiene por objeto adaptar al organismo a las variaciones del medio exterior, manteniéndolo en condiciones operativas mediante el ajuste de parámetros de su medio interno (Cannon, 1932).

Por otro lado, cuando un efecto se produce, el efecto se destaca y diferencia de su entorno como un evento de baja probabilidad de ocurrencia. Esto significa que tiene un bajo nivel de entropía. Por la ley universal de la entropía creciente, que postula que todo sistema en un estado de baja entropía (orden) tiende a pasar a un estado de mayor entropía (desorden), los valores de los factores pueden deslizarse hacia regiones más indiferenciadas, saliéndose del dominio del efecto, por lo cual el efecto deja de existir (De Latil, 1958).

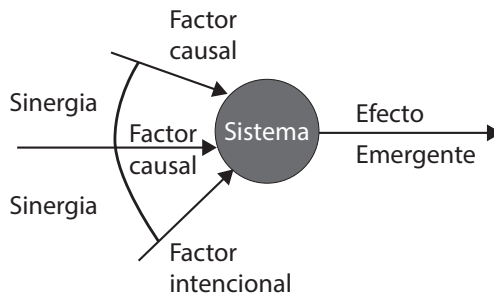
Los sistemas complejos deben evitar la tendencia al aumento de su entropía, es decir, la tendencia a desorganizarse. Esto requiere que el estado del sistema navegue hacia un atractor del espacio de estados, capaz de proveerlo con los recursos necesarios de materia, energía e información (recibiendo entropía negativa) para mantenerlo en un estado viable.

## Mecanismos cibernéticos de adaptación

Para evitar que un efecto deseable desaparezca o un efecto indeseable persista, el sistema puede proveerse de mecanismos cibernéticos de adaptación que tienen por objeto neutralizar la contingencia y el crecimiento de la entropía. Algunos mecanismos cibernéticos de adaptación son la sinergia, la retroalimentación y la prealimentación.

- 1) La *sinergia*, se da acoplando la acción de dos o más factores hasta lograr la emergencia del efecto deseado (Haken, 1978), por ejemplo, cuando se pide la colaboración de un colega para resolver conjuntamente (sinergia) un problema. Los factores sinérgicos pueden ser causales o intencionales, por ejemplo, cuando se tiene el deseo de remediar un malestar (factor intencional) y se ingiere un medicamento (factor causal), el efecto es el alivio del malestar

FIGURA III.9. Sinergia entre factores causales e intencionales

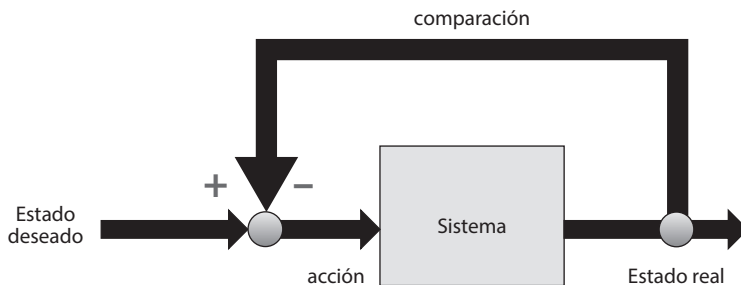


- 2) La retroalimentación o *feedback* (Ashby, 1956) consiste en una relación de calidad circular del efecto, de modo que si el efecto se aparta de un valor prescrito deseado, esta desviación genera una respuesta del sistema que compensa esa discrepancia, y el efecto asume su valor prescrito. En este caso, la retroalimentación es negativa porque se opone a la existencia de la discrepancia. Por ejemplo, si se está preparando culinariamente un platillo, se prueba el sabor y se detecta que le falta sal; por retroalimentación, se le agrega la cantidad de sal necesaria para que el sabor quede en el valor prescrito. En la retroalimentación positiva, por el contrario, la respuesta del sistema refuerza la desviación entre el efecto y un valor dado, y el efecto se aleja de ese valor dado atenuándose o

desbocándose. Por ejemplo, si un empresario amplía la distribución de sus productos y las ventas aumentan por encima del año anterior, por retroalimentación positiva, decide seguir mejorando en este año su distribución para ampliar aún más las ventas del siguiente año.

La autocatálisis es un fenómeno con retroalimentación positiva donde, además de producirse un efecto, se produce también el catalizador que lo provoca. Por ejemplo, en la maduración de frutos climatéricos se produce etileno, el etileno producido promueve la síntesis de enzimas de maduración, por lo cual se genera más etileno y el proceso de maduración se acelera. Hay autocatalizadores sociales o simbólicos, como las ideas, las creencias, las ideologías, las emociones y los rumores. Los catalizadores sociales son catalizadores simbólicos. Surgen de la necesidad de varios agentes de lograr un objetivo común: de ella nace la colaboración. La colaboración y la cooperación son el resultado emergente de reglas egoístas para que un agente logre un objetivo personal, ayudado por otros.

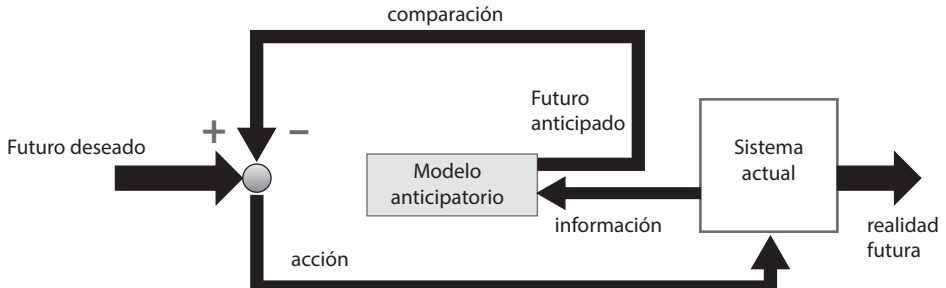
FIGURA III.10. Mecanismo de retroalimentación



- 3) La prealimentación o *feedforward* (MacKay, 1966) consiste en una acción de control anticipado del efecto. Para ello se pronostica el valor del efecto en un futuro dado mediante un modelo anticipatorio, de modo que si el efecto pronosticado se aparta de un valor futuro prescrito deseado, esta desviación genera una acción presente sobre el sistema para evitar esa discrepancia futura, y el efecto en el futuro asumirá su valor prescrito. En este caso, la prealimentación es negativa porque se opone a la existencia de la discrepancia. Por ejemplo, en la Cumbre de París sobre el calentamiento global en junio de 2016 se logró un acuerdo entre 195 países para limitar el aumento de la temperatura del planeta a un máximo de 2 °C para finales del siglo XXI, dados los pronósticos

tendenciales catastróficos. En la prealimentación positiva, por el contrario, la acción sobre el sistema refuerza la desviación entre el pronóstico del efecto y un valor prescrito, y el efecto se aleja de ese valor dado atenuándose o desbocándose.

FIGURA III.11. Mecanismo de prealimentación



La sustracción del efecto a las contingencias del entorno se logra mediante la adaptación por homeostasis, que es un mecanismo de retroalimentación que tiene por objeto adaptar el organismo a las variaciones del medio exterior, manteniéndolo en condiciones operativas.

El concepto de homeostasis fue introducido por el fisiólogo Walter Cannon (1932), y aplicado al análisis de sistemas sociales por Talcott Parsons (1964). Sin embargo, ya en 1952 el concepto original de homeostasis había sido ampliado para las ciencias de la conducta como la educación, por el psiquiatra Walter Ross Ashby (1952) en su libro *Design for a Brain*, que conceptúa la homeostasis como la búsqueda de una combinación de acciones que mantenga al efecto dentro de su dominio.

Homeostasis es pues el proceso por el que un sistema mantiene el equilibrio funcional de su medio interno frente a las variaciones del medio externo. Hay dos tipos de cambio que enfrenta la homeostasis: a) el cambio continuo, no disruptivo, al cual reacciona el sistema adaptando sus estados a las fluctuaciones normales del entorno. Muchas de estas formas de homeostasis son muy ligeras y los sistemas pueden navegar por ellas sin experimentar un cambio significativo. En este caso, la homeostasis no es una inmovilidad forzada ni un estado fijo del sistema, sino una serie de leves cambios del sistema relativamente pequeños y que abarcan un rango limitado de comportamientos. Varios atractores pueden interactuar entre sí para producir comportamientos más complejos; b) la otra forma de homeostasis es un cambio radical del estado de un sistema, que atraviesa una separatriz, lo que implica desestabilizar al sis-

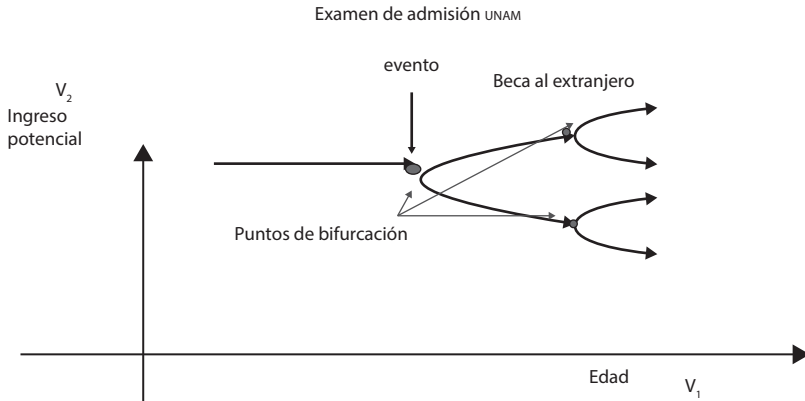
tema e impulsarlo hacia otro atractor. En estas ocasiones, el entorno demanda del sistema una reformulación de su homeostasis. En tales casos, el sistema debe buscar nuevos patrones de comportamiento que le permitan su supervivencia o debe tratar de regresar a su estado original. Es una navegación al borde del caos.

## Cambios inducidos por el entorno

Existen tres tipos importantes de cambios inducidos por el entorno: las bifurcaciones, las catástrofes y el caos.

Una *bifurcación* es un estado de inestabilidad en el espacio de estados del sistema donde, por efecto de un cambio en el entorno que altera los parámetros exógenos, un sistema cambia de un conjunto invariante a otro con una trayectoria completamente diferente. La bifurcación es de tal naturaleza que un pequeño cambio en los parámetros exógenos de un sistema produce inmediatamente un gran cambio en su trayectoria, por ejemplo, el caso de un estudiante que desea ingresar a la universidad. Su espacio de estados tiene dos variables de estado: su edad y su ingreso potencial. Cuando tenga la edad suficiente, presentará su examen de ingreso a la universidad, y ahí hay un punto de bifurcación: si aprueba el examen, su trayectoria sería la línea superior. Si no lo aprueba, su trayectoria sería la línea inferior, donde tendría que trabajar. Si entra a la universidad en unos años llegará a otro punto de bifurcación, donde podrá pedir una beca para hacer posgrado en el extranjero, y a su regreso tendrá un buen ingreso. Si no entra a la universidad, en unos años de trabajo podrá hacer un curso de especialización que le significaría mejores ingresos, aunque menores que si hubiera hecho la licenciatura y el posgrado. Si no hace el curso de especialización, se volverá obsoleto y disminuirán las oportunidades de mejorar su ingreso.

FIGURA III.12. Diagrama de una bifurcación



El *cambio catastrófico* ocurre cuando un sistema deja su nicho de aptitud y migra a otro en un pico de aptitud diferente, cruzando una separatriz. La catástrofe no significa necesariamente un cambio devastador, sino un cambio significativo en la estructura del sistema al madurar, o un cambio en lo que hace o cómo lo hace o un cambio en su nivel de aptitud. El cambio catastrófico ocurre fácilmente en sistemas caóticos y, raramente, en sistemas estables. Sin embargo, los sistemas que funcionan al borde del caos, como los sistemas biológicos y sociales, pueden encontrarse ocasionalmente con eventos impredecibles y casuales que los pueden arrojar a la catástrofe. Así, eventos que un día no tienen importancia pueden provocar una catástrofe al día siguiente. Otras veces están sucediendo cosas detrás del escenario que están preparando: un cambio repentino. El cambio no se da sin antecedentes históricos pero, a menudo, la historia es ignorada y el cambio resulta sorprendente. Un ejemplo de cambio catastrófico es la construcción de un montón de arena grano a grano. Llega un momento en que el montón de arena llega a un punto de equilibrio crítico y se desgaja en una avalancha.

Las *transiciones de fase* son una variante de las catástrofes y se definen como el fenómeno por el que un sistema pasa repentinamente de un estado organizado a otro estado organizado, con valores radicalmente diferentes de sus variables de estado. Ejemplos de transiciones de fase en las ciencias naturales son la ebullición del agua (paso del estado líquido al gaseoso) al calentarse o la formación de hielo (paso del estado líquido al sólido) al enfriarse. En las sociedades, las transiciones de fase se dan en los cambios revolucionarios cuando una revolución derroca a la monar-

quía e instaure una república o cuando un golpe de estado liquida el sistema constitucional e instala una dictadura. En las organizaciones, las transiciones de fase se dan, por ejemplo, en las fusiones corporativas o en la adquisición de una organización por otra.

### Principio de la variedad requerida y principio de la complejidad requerida

Ross Ashby en los años sesenta formuló en el marco de la cibernética el principio de la variedad requerida (Ashby, 1956). Éste afirma que para que un sistema pueda enfrentar un entorno con una cierta variedad de acciones posibles, el sistema debe ser capaz de generar al menos una variedad de acciones de respuesta igual a la variedad de acciones que presenta el entorno. Actualmente, este principio se puede reformular en términos de los sistemas complejos como el principio de la complejidad requerida (Bar-Yam, 1997): para que un sistema pueda enfrentar exitosamente un entorno de cierta complejidad, definida por la diversidad de situaciones que dicho entorno puede presentar, debe tener al menos una complejidad equivalente que pueda generar una diversidad de respuestas y seleccionar las apropiadas.

Enfrentar un entorno complejo requiere hacer la selección correcta de las acciones en medio de una gran diversidad de acciones incorrectas posibles. Hacer esta selección requiere de una gran complejidad, por ejemplo, los hijos de los seres vivos. El porcentaje de crías que sobreviven hasta volverse adultas depende de la complejidad. Los mamíferos tienen hasta una docena de crías. Las ranas tienen miles, los peces tienen millones y los insectos miles de millones. En cada caso, en promedio, por cada adulto que se reproduce sólo un hijo sobrevive como para reproducirse (Bar-Yam, 1997).

### Complejidad y escala

La complejidad de un sistema está relacionada con la cantidad de información necesaria para describir el sistema y con su comportamiento en torno a un problema. Por lo tanto, la complejidad de un sistema es relativa y depende del problema. Así, describir un sistema implica entonces tomar una decisión sobre el nivel de detalle requerido para resolver el problema, por lo cual la complejidad depende de la escala de descripción (Bar-Yam, 1997).



Para analizar un problema hay que definir el nivel de análisis. En efecto, cuando las partes actúan independientemente, el comportamiento a nivel fino es más complejo, pero no hay comportamiento organizado a gran escala; y así, en el límite, a gran escala no sólo el sistema no es complejo sino que puede ser que no haya sistema (Bar-Yam, 1997). Por ejemplo, el sector minifundista en el campo consta de una infinidad de parcelas, cuya descripción sería muy detallada, pero a nivel global —como no hay interacciones entre las parcelas— se tiene un problema de complejidad desorganizada que puede resolverse por medio de la estadística. En cambio, cuando las partes actúan conjuntamente, como las neuronas del cerebro, la complejidad a pequeña escala (la neurona) puede ser pequeña, pero hay un comportamiento organizado a una escala mayor (la conciencia y el comportamiento consciente) que tiene una gran complejidad.

La complejidad de un sistema, a una cierta escala, no sólo depende del número de componentes que tiene en esa escala, sino de qué tan independientes u organizados están los componentes en cada jerarquía. Entonces, el perfil de complejidad de un sistema caracteriza la dependencia de la complejidad del sistema con respecto a la escala a la que se analiza. Esto es, a una cierta escala, ¿cuántas posibilidades de acción tiene el sistema? (Bar-Yam, 1997).

Cuando las unidades a un nivel bajo de escala son más independientes, la complejidad es mayor a ese nivel, en cambio, la complejidad a escala mayor decrece. En efecto, no hay coordinación a gran escala porque es más difícil coordinar a los componentes independientes para acciones conjuntas.

### Principio de la escala de acciones requerida

El principio de la escala de acciones requerida (Bar-Yam, 1997) afirma que los retos a cierta escala del entorno deben ser enfrentados con comportamientos a nivel de la misma. De aquí se deriva que un sistema apto es el que exhibe suficiente complejidad de acciones a cada escala de situaciones del entorno para cumplir con sus objetivos. Por lo tanto, la mayor parte de los sistemas debe estar preparada para afrontar mediante acciones muchas situaciones a muy diferentes escalas.

Algunas situaciones requieren una acción coordinada a gran escala, mientras otras situaciones requieren de múltiples acciones parcialmente independientes a pequeña escala. Una acción para aplicar la fuerza a gran escala no es apropiada para actuar a pequeña escala y recíprocamente.

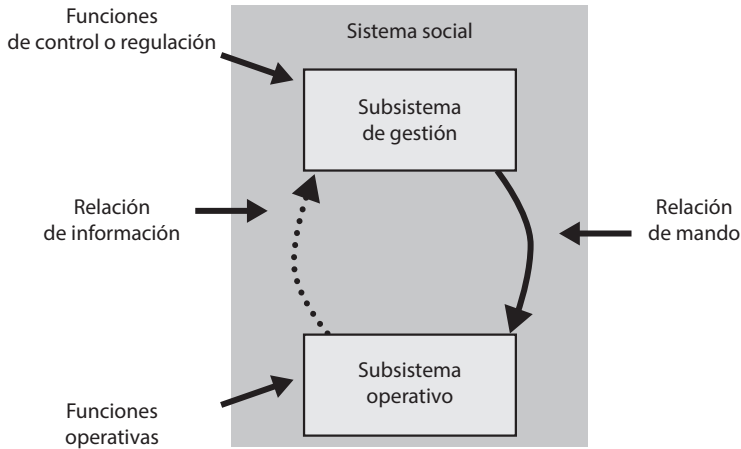
Por ejemplo, el cuerpo humano es un sistema apto y eficiente para actuar en una variedad de escalas. Así se tiene: a gran escala, el correr ante una agresión. El subsistema involucrado es el sistema neuromuscular constituido por un subsistema de control que es la red neuronal del sistema nervioso central y un subsistema ejecutor que son los músculos de las piernas. En cambio, si se trata de una infección bacteriana provocada por una infinidad de bacterias y tipos de bacterias, entra en función el sistema inmunológico constituido por los anticuerpos y los linfocitos, que pueden destruir bacteria por bacteria (Bar-Yam, 1997).

Un ejemplo del fracaso de no seguir el principio de la escala de acciones requerida, en la solución de un problema, fue la derrota de los Estados Unidos en la guerra de Vietnam, porque se enfrentaron a un enemigo muy diverso y con una alta complejidad a pequeña escala, con tácticas de guerrilla, con un ejército regular, con un mando centralizado y, por lo tanto, contra una muy baja complejidad a pequeña escala.

## Funciones de información y control de los sistemas sociales

En los sistemas sociales la influencia intencional de unas personas sobre otras la podemos conceptualizar como una *función de control*. Este control se da principalmente a través de una estructura organizacional en la que podemos identificar dos subsistemas: el subsistema de gestión y el subsistema operativo. El *subsistema de gestión* es el que ejerce las funciones de control o regulación, en tanto que el *subsistema operativo* es el que desempeña las funciones productivas del sistema. Entre estos subsistemas se establecen dos tipos de relaciones: las *relaciones de mando* que van del subsistema de gestión hacia el operativo para regular sus funciones, y las *relaciones de información* que van del subsistema operativo al subsistema de gestión y que permiten al subsistema de gestión tomar las decisiones adecuadas en cada caso, dependiendo de la situación.

FIGURA III.13. Modelo cibernético de un sistema social



En las organizaciones tradicionales bajo un principio reduccionista el control se ejercita a través de una jerarquía. En una jerarquía tradicional el control se ejerce en forma vertical. Las personas se comunican entre sí sólo entre diversos niveles. La comunicación hacia arriba de la jerarquía, desde los niveles inferiores hacia los superiores, filtra la información necesaria para los jefes mientras que la comunicación hacia abajo de la jerarquía, desde los niveles superiores hacia los inferiores, provee los detalles que necesitan los operadores (Bar-Yam, 1997).

Por ejemplo, en un sistema social a gran escala como un ejército o una fábrica estilo Ford, la jerarquía permite a un solo individuo (el general en jefe o el director general) controlar los comportamientos a gran escala. El director no necesita los detalles de lo que hace cada individuo, sino que requiere tener información de lo que afecta a gran parte de la organización. En tanto que un solo individuo sea el responsable de coordinar las partes de una organización, los comportamientos coordinados de la organización no podrán ser más complejos que la complejidad de ese individuo. En consecuencia, ya que todo el comportamiento a gran escala en un sistema jerárquico depende de una persona (del director general) el comportamiento a gran escala no puede ser más complejo que la complejidad del director. Sin embargo, el mundo se ha vuelto cada vez más interdependiente. Lo que pasa en un lugar tiene repercusiones en otros lugares. La complejidad del mundo a grandes y pequeñas escalas ha aumentado. En este caso, la estructura jerárquica tradicional es inepta para estar a la altura de los retos del entorno ya que la complejidad de un individuo, que es el director, debe enfrentar la complejidad presente del

entorno a todas las escalas para aumentar la probabilidad de supervivencia. Así, tener una jerarquía vertical de control es útil para amplificar la escala de la respuesta, pero no su complejidad, por lo cual las jerarquías verticales son ineficaces para coordinar tareas de alta complejidad. Para tales tareas es necesario un control distribuido en redes.

## Estructuras distribuidas en sistemas sociales

Para enfrentar entornos complejos en sistemas sociales, necesitamos una organización distribuida o estructurada en redes, que son estructuras complejas. Esto no se puede decir de las jerarquías verticales. Una jerarquía vertical permite amplificar el rango de acción de un individuo, pero no puede dotar al sistema con una complejidad mayor que la de sus partes. Por ejemplo, el sistema neuromuscular del cuerpo actúa con una alta complejidad a gran escala, pero está coordinado por una red de control distribuido que es el sistema nervioso central.

## Estructura interna de una organización distribuida de un sistema social

La estructura interna de un sistema social depende de tres parámetros (Kauffman, 1993): primeramente, el número  $N$  de integrantes. En segundo lugar, la fuerza de acoplamiento  $K$  entre integrantes, que se puede definir como el número promedio  $K$  de otros integrantes a los que se conecta cada integrante. En tercer lugar, los tipos de acoplamiento  $P$  que se establecen entre los integrantes.

Si el número  $N$  de integrantes aumenta, aumenta el número de restricciones conflictivas entre integrantes, lo cual disminuye las probabilidades de éxito. A esto Kauffman lo llamó la *catástrofe de la complejidad* (Kauffman, 1993).

El cambio de un sistema es a menudo una consecuencia natural de la interacción entre los integrantes, y el proceso no requiere de una perturbación externa que lo explique. Esta es la dinámica interna del sistema. La interacción depende del acoplamiento interno. El *acoplamiento interno* se refiere al número  $K$  de enlaces entre los integrantes del sistema y también a la naturaleza  $P$  de las relaciones entre los integrantes. Un índice adecuado  $P$  puede contrarrestar un alto  $K$  y viceversa. El *acoplamiento externo* entre sistemas se refiere al número  $S$  de sistemas acoplados en un nicho, y al grado  $C$  en que los sistemas se afectan uno al otro.

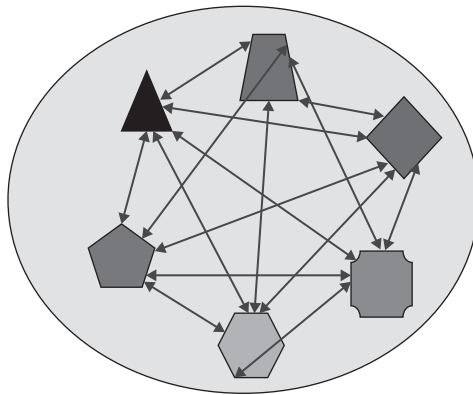
Los sistemas pueden ser fuertemente acoplados en una característica, pero ligeramente acoplados en otra.

### Características del alto acoplamiento

Los sistemas fuertemente acoplados (alto  $K$ ): *a*) son muy rígidos en términos de adaptación al cambio, es decir, tienen una gran inercia y escasa adaptabilidad y capacidad de aprendizaje; *b*) cuando sufren un fuerte impacto del entorno, este impacto se propaga por todo el sistema afectando a todos los integrantes (efecto dominó); *c*) su subsistema de gestión es centralizado y dominante; *d*) son caóticos porque el cambio en un integrante puede suscitar cambios imprevisibles; *e*) poseen pocas separatrices y pueden ir de un atractor a otro con alta volatilidad.

FIGURA III.14. Sistema con alto acoplamiento interno

Estructura de un sistema con alto acoplamiento



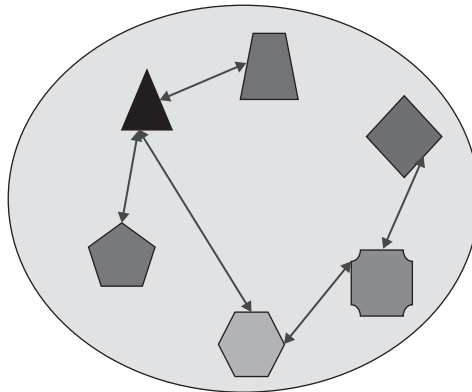
### Características del acoplamiento ligero

Los sistemas ligeramente acoplados (bajo  $K$ ), en cambio: *a*) son muy flexibles para que cada integrante se adapte a su propio entorno y aprenda a desenvolverse en él cuando el cambio de todo el sistema pudiera ser problemático. Sin embargo, dificulta la difusión de cambios locales que podrían beneficiar a todo el sistema; *b*) son estables porque si uno de los integrantes sufre un fuerte impacto del entorno, éste no se propaga al resto; *c*) el cambio ocurre más fácilmente cuando la organización desarrolla

grupos pequeños e independientes y luego los va cambiando en vez de forzar a todo el sistema a cambiar. La desventaja es que las unidades ligeramente acopladas no son presionadas a discontinuar prácticas ineficientes; *d)* la organización con acoplamientos ligeros puede permitir a unidades aisladas experimentar con nuevas estructuras y procedimientos, sin comprometer a todo el sistema. Sin embargo, puede inhibir la difusión de experimentos que sean productivos; *e)* el acoplamiento ligero puede aislar problemas locales. Sin embargo, la unidad con problemas puede recibir poca ayuda de otras unidades para resolver sus problemas; *f)* su subsistema de gestión es descentralizado y poco coordinado. La autodeterminación es fomentada por el acoplamiento ligero y permite una respuesta más flexible frente a entornos inciertos. Sin embargo, las unidades aisladas están dejadas a su destino en situaciones hostiles; *g)* es más barato operar un sistema ligeramente acoplado que proveer los sistemas de coordinación necesarios para una estructura fuertemente acoplada. Sin embargo, se pierde control a nivel global.

FIGURA III.15. Sistema con acoplamiento interno ligero

Estructura de un sistema con acoplamiento ligero



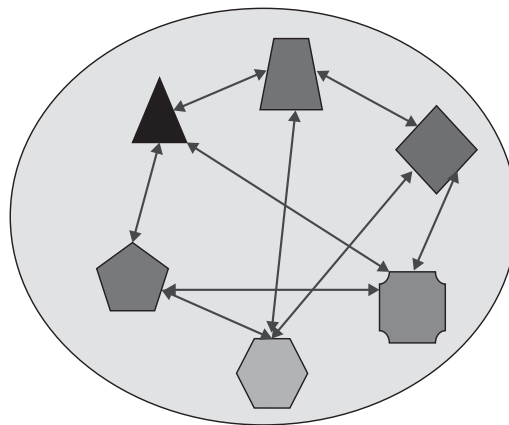
### Características del acoplamiento intermedio al borde del caos

*a)* El acoplamiento moderado permite el crecimiento y cambio organizacional de manera incremental y controlada. *b)* La interacción moderada es un requisito para el cambio. La acción egoísta de una unidad compro-

mete la aptitud de otra forzándola a cambiar, y así sucesivamente. *c)* Los actores en interacción moderada son capaces de perturbar los paisajes de aptitud de otros, pero no destruirlos. Este equilibrio sucede en el borde del caos. *d)* Los sistemas aptos no son fuertemente ni débilmente acoplados: tienen un acoplamiento intermedio y existen al borde del caos (Marion, 1995). *e)* Unidades apropiadamente acopladas son capaces de cambio, pero están protegidas del daño en cascada por la aptitud óptima que encuentran al borde del caos. *f)* Las unidades interactuantes al borde del caos tienen separatrices difícilmente penetrables, aislando diferentes atractores. En sistemas sociales, las separatrices están constituidas por tradiciones, reglas, tabúes, ideologías, religiones. *g)* Cuando ocurre daño en cascada, buscamos factores externos pero, más frecuentemente, es el resultado de la dinámica interna normal que, sin razón particular, de repente se sale de control.

FIGURA III.16. Sistema con acoplamiento intermedio al borde del caos

Estructura de un sistema con acoplamiento intermedio al borde del caos



### Paisaje de hoyos de estabilidad

No sólo la aptitud en el entorno es importante, también lo es la *estabilidad* que es la probabilidad de permanecer en un atractor, a pesar de los

cambios en el entorno. El paisaje de hoyos de estabilidad ilustra la estabilidad del sistema en el espacio de estados.

Los sistemas navegan por el espacio de estados, mediante una homeostasis dinámica, buscando estados donde además de tener una alta aptitud estén en un estado estable, esto es, en un estado de mínima energía potencial que, en este paisaje, es un atractor representado por un hoyo. Los sistemas interactúan, cambian, compiten y deforman los paisajes de otros, llegando a sacarlos de sus atractores (hoyos). Sin embargo, si los atractores (hoyos) en los que se encuentran los sistemas son profundos, es más estable su situación.

Por otro lado, los paisajes no están en reposo sino que cambian. Así, los paisajes de atractores vibran, los atractores (hoyos) se contraen o se profundizan, aparecen o desaparecen. Estos cambios mueven a los sistemas que recorren los paisajes de atractor en atractor o, incluso, los sacan de existencia. Además, si los paisajes son coevolutivos, se perturban mutuamente.



#### IV. LOS SISTEMAS ADAPTATIVOS COMPLEJOS (SAC)

Los sistemas adaptativos complejos (SAC) son efectores complejos, organizados y autorregulados para sustraerse a sí mismos o a uno de sus efectos —dentro de ciertos límites— a la contingencia, al aumento de la entropía o a ambas; por ejemplo, un ser vivo, un sistema ecológico, un grupo social, el ciberespacio, etc. Los sistemas adaptativos complejos se clasifican en cuatro grupos: 1) artificiales, que son fabricados por el hombre, por ejemplo: la red de transmisión de energía eléctrica de un país, el mercado de productos alimenticios, la bolsa de valores, el ciberespacio, etc.; 2) biológicos, por ejemplo: una planta, un animal, el cuerpo humano, etc.; 3) psíquicos, por ejemplo: la mente de un ser humano, y 4) sociales, por ejemplo: una familia, una comunidad, una organización.

Un SAC consta de numerosos componentes diversos y autónomos (llamados agentes) que son interdependientes; están acoplados selectivamente por autoorganización a través de numerosas interconexiones; son homeostáticos; se comportan como un todo unificado al aprender de la experiencia y se ajustan adaptándose a los cambios en el entorno; pueden aprender de la experiencia construyendo atractores, a partir de su memoria, para facilitar sus respuestas ante el entorno. Un agente en un sistema biológico es una célula, en un sistema económico es un comprador o vendedor, en un sistema cultural es un meme, en un sistema organizacional es un individuo.

A diferentes escalas pueden ser definidos agentes diferentes (Dooley, 1996). Cada agente individual de un SAC es en sí un SAC. Así, un árbol es un SAC dentro de un SAC más grande (un bosque), que es un SAC en un SAC aún mayor (un ecosistema). Asimismo, un individuo es sólo un SAC en un grupo de varios abarcando progresivamente una familia, una comunidad, una provincia y una nación. Cada agente se mantiene en un entorno que se crea a través de sus interacciones con otros agentes. Cada SAC es más que la suma de sus agentes que lo constituyen, y su comportamiento y propiedades no se pueden establecer a partir de los comportamientos y propiedades de los agentes. Los SAC tienen un gran número de agentes que interactúan, y la interacción es dinámica. Cada agente dentro del sistema cambia con el tiempo y también lo hacen los agentes con los que interactúa el mismo sistema, así como el entorno en el cual interactúan todos ellos.

Cada agente se mantiene en un entorno específico que contribuye a crear, mediante sus interacciones, con otros agentes. Las interrelaciones a

todos los niveles son no lineales y dinámicas. La no linealidad provoca que pequeñas perturbaciones puedan tener grandes resultados (*efecto mariposa*), y que grandes perturbaciones puedan tener pocas consecuencias (*efecto indiferencia*). El poder de los pequeños eventos (efecto mariposa) “aparentemente menores, puede dar lugar al surgimiento de grandes resultados; los sistemas son sensibles en cualquier momento en el tiempo a las condiciones prevalecientes en ese momento, y pueden así iniciar procesos de cambio que son substanciales y dramáticos” (Rosenau, 1997). Las interrelaciones son dinámicas porque varían en el tiempo y pueden ser físicas (intercambio de materia o energía) o pueden ser de intercambio de información (Cilliers, 1998). Las interacciones tienen en general un alcance muy corto, pero que puede manifestarse a grandes distancias, en SAC estructurados como redes de mundo pequeño, si la red de interacciones es densa.

Cada SAC es más que la suma de sus agentes que lo constituyen, y su comportamiento y propiedades no se pueden predecir a partir de los comportamientos y propiedades de los agentes. Los SAC se caracterizan por un control difuso (distribuido) y no centralizado y, a diferencia de los sistemas rígidos (mecánicos), cambian en respuesta a la información recibida de su entorno para sobrevivir y prosperar en situaciones nuevas, navegando por su paisaje de aptitud. En el mundo inanimado, muchos fenómenos se comportan como SAC, tales como las tendencias de la moda, las bolsas, los atascos de tráfico.

Hay bucles de retroalimentación en las interacciones. El efecto de cualquier actividad puede retroalimentarse a sí mismo algunas veces, directamente, y otras veces, después de un número de etapas intermedias. Este fenómeno puede dar lugar a una fuerte amplificación si la retroalimentación es positiva. Si la retroalimentación es negativa, el resultado es una estabilización forzada. El término técnico de estas autorretroalimentaciones del sistema complejo es *recurrencia*.

Cada elemento en el sistema es ignorante del comportamiento del sistema como un todo; responde sólo a la información que está disponible para él localmente. Este punto es muy importante, señala Cilliers (1998). Si cada elemento supiera lo que estuviera sucediendo en el sistema como un todo, la totalidad de la complejidad tendría que estar presente en ese elemento, lo cual es imposible. La complejidad es el resultado de la abundante interacción de elementos simples, que sólo responden a la limitada información que se le presenta a cada uno de ellos. Cuando vemos el comportamiento de un sistema complejo como un todo, nuestro enfoque se debe desplazar del elemento individual en el sistema a la estructura global compleja del sistema. Los agentes de los SAC pueden

construir patrones de conexiones y comportamiento en forma autoorganizada, es decir, no impuestos desde fuera del sistema. A medida que esto sucede, emergen nuevas propiedades o atributos. Los SAC operan lejos del equilibrio porque hay un flujo constante de energía que viene del exterior, que mantiene la organización del sistema y asegura su sobrevivencia. El equilibrio aquí es sinónimo de muerte.

Los SAC evolucionan y su pasado es corresponsable de su comportamiento actual. Los SAC existen dentro de su propio entorno. Por lo tanto, al cambiar el entorno necesitan cambiar también para garantizar el mejor ajuste. Cuando el cambio es permanente, se convierte en evolución. La evolución de un SAC es como un viaje a través del paisaje de aptitud, con el objetivo de localizar el pico de aptitud más alto. El sistema puede quedarse atrapado en el primer pico al que se acerca si su estrategia es incremental o de mejora progresiva. Sin embargo, si el sistema cambia su estrategia, otras redes interconectadas responderán y el paisaje cambiará. Cuando un sistema se ajusta y evoluciona, cambia su entorno y hace que otros agentes se tengan que ajustar al nuevo entorno, evolucionando también. Este fenómeno se llama coevolución. Por ejemplo, si un animal evoluciona, sus parásitos tienen que evolucionar (coevolucionar) también o no sobreviven.

La principal diferencia entre sistemas caóticos y los SAC es que el comportamiento de éstos depende de su trayectoria o historia (*path dependence*) (Arthur, 1999), en cambio, la dinámica de los sistemas caóticos no se sustenta en su historia.

## Sistemas adaptativos complejos y su función homeostática

Los agentes son unidades semiautónomas que buscan maximizar alguna medida de su aptitud evolucionando en el tiempo. Los agentes exploran su entorno mediante sensores y esquemas de percepción, y desarrollan —mediante un procesador— esquemas de acción homeostática, que son memes que integran tanto reglas de interpretación del entorno, como reglas de acción (Dooley, 1996). Estos esquemas de acción homeostática se componen a menudo de memes básicos homeostáticos. Por ejemplo, un esquema homeostático de cómo vestirse si hace frío involucra un meme básico que establece: es incómodo tener frío (Dooley, 1997). En un sistema organizacional, los memes básicos se representan en la forma de actitudes generales hacia otras áreas de la organización, así como valores, símbolos, mitos y elementos de la cultura organizacional. Estos esquemas homeostáticos pueden ser difusos debi-

do a la falta de información y a que son dependientes del observador, e incluso pueden ser contradictorios.

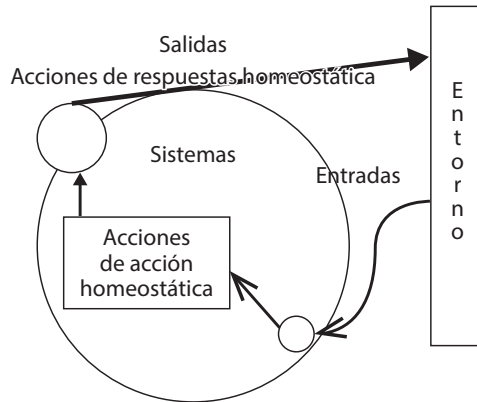
Los esquemas de acción homeostática son múltiples y, como todo meme, compiten por la supervivencia y pueden sufrir tres tipos de cambio: un cambio de primer orden cuando se toma la acción para adaptar la observación al esquema existente, un cambio de segundo orden cuando se modifica intencionalmente un esquema para adecuarlo mejor a las observaciones, y un cambio de tercer orden cuando un esquema sobrevive o muere debido a la supervivencia o muerte de su SAC correspondiente (Dooley, 1996). En SAC organizacionales, numerosos investigadores han identificado la existencia de cambios de primero y segundo orden. Argyris y Schon (1978), y Hannan y Freeman (1989) han identificado cambios de tercer orden en organizaciones.

Los SAC tienen un sistema procesador de control difuso (distribuido) y no centralizado y, a diferencia de los sistemas mecánicos, su comportamiento depende de la información recibida de su entorno, que utiliza para sobrevivir y prosperar en entornos cambiantes. En el mundo inanimado existen muchos fenómenos que afectan a los sistemas humanos y sociales que se comportan como SAC, tales como la moda, la delincuencia organizada, los partidos políticos, las bolsas de valores, los embotellamientos de tráfico.

El medio ambiente o entorno de un SAC envía, así, distintos tipos de señales, tales como ondas electromagnéticas (luz producida o reflejada), presiones mecánicas, emanaciones de sustancias químicas, etc., que cuando pueden ser detectadas y analizadas por los receptores y los esquemas de interpretación de un SAC, pueden proporcionarle información sobre el entorno del que provienen las señales, por ejemplo, dimensiones espaciales, formas, colores, composición, etc., de manera que ante una contingencia o un cambio provocado por el entorno, pueda responder en la forma más adecuada mediante esquemas de acción homeostática, sin perder su aptitud. Esta información es esencial para la interacción apropiada con el entorno y la generación de una respuesta homeostática.

FIGURA IV.1. Esquemas de acción homeostática

Funciones sistemáticas adaptativas complejas



Así, cuando un sistema es un SAC, tiene la capacidad de detectar y analizar las señales que le llegan del entorno para extraer información sobre el mismo, se forma imágenes del mundo y de sí mismo, y de acuerdo con ellas, mediante esquemas de acción homeostática, puede determinar lo que debe hacer para cumplir con sus fines, frente a la situación propia y del entorno que ha detectado (Lara-Rosano, 2016a).

Las funciones sistémicas adaptativas complejas son entonces: el sentido y los esquemas de percepción e interpretación de las señales del entorno, el procesamiento de los esquemas de acción homeostática y las acciones de respuesta homeostática (Lara-Rosano, 2002).

### Redundancia en un sistema

Se dice que existe *redundancia funcional* en un sistema cuando existe un agente o conjunto de agentes, que pueden desempeñar una cierta función cuando dicha función no puede ser desempeñada por fallas en los agentes que deberían desempeñarla, por ejemplo, el *no-break* de una computadora. Se dice que existe *redundancia estructural* en una red cuando existe más de un camino para transitar de un vértice a otro de la red. Por ejemplo, de México a Cuernavaca hay una carretera federal libre y una carretera de cuota. La redundancia estructural puede dar lugar a una redundancia funcional. Por ejemplo, si la carretera de cuota a Cuernavaca está bloqueada, puedo ir a Cuernavaca por la libre. Toda redundancia implica un costo.

## Resiliencia de un sistema

La resiliencia es el grado de robustez de un sistema por cambios provocados por el entorno en sus partes o agentes integrantes, sin perder aptitud para cumplir ciertos objetivos. Cuando existen elementos redundantes en el sistema y algunos de éstos pueden desempeñar la misma función de otros elementos que fallaron, se dice que hay redundancia funcional. Esta característica le da estabilidad y resiliencia al sistema. La resiliencia es el resultado de una fuerza autoorganizadora que puede superar una variedad de cambios en los integrantes de nivel inferior, para que el sistema pueda recuperar su funcionalidad ante eventos perturbadores del entorno.

## Redes sistémicas complejas adaptativas

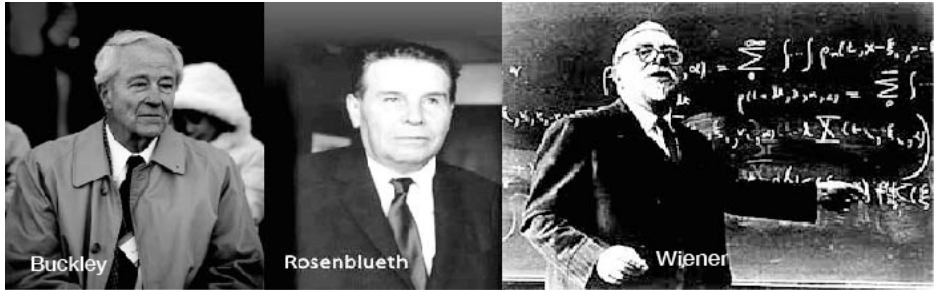
El fenómeno de interacción autoorganizante en SAC se modela utilizando el enfoque de las redes sociales. A este tipo de modelos los designaremos como redes sistémicas complejas adaptativas, que aplicaremos al estudio de sistemas sociales.

Una *red sistémica compleja adaptativa* (RSAC) (Stacey, 2001) es un conjunto de agentes, colectivos o sistemas interrelacionados que interactúan con arreglo a leyes locales para lograr objetivos locales, y que tienen la capacidad inherente de producir, por autoorganización, patrones de conducta emergentes, por ejemplo, las redes de neuronas en el cerebro, las redes de comunicaciones como la internet, la comunidad europea, los cárteles de la delincuencia organizada, la Organización de las Naciones Unidas, la Iglesia Católica Apostólica Romana, etc. La teoría de la complejidad hace hincapié en la elevada aptitud potencial de una red sistémica compleja adaptativa, y no sólo en la aptitud de sus agentes o sistemas integrantes relacionados interactivamente.

## Los sistemas sociales y humanos como sistemas adaptativos complejos

Las fuentes de la complejidad en las ciencias sociales y humanas no son sólo los elementos dinámicos, interrelacionados mecanicísticamente, asíncronos, acoplados en forma no lineal, que podemos encontrar también en el mundo humano y social, sino los “numerosos bucles de retroalimentación positiva y negativa” (Buckley, 1968, p. 24), y “un comportamiento te-

leológico activo de elementos dinámicos que no puede ser explicado por la calidad común” (Rosenblueth, Wiener y Bigelow, 1943, p. 5).



El concepto de sistemas adaptativos complejos (SAC) fue introducido por Walter Buckley en 1967 (Buckley, 1967, p. 5):

Nuestra investigación nos conduce a un examen de los principios cibernéticos de control, las retroalimentaciones positivas y negativas, la comunicación y el procesamiento de la información, la búsqueda de metas, la autoconciencia y la autodirección, etc. Además, dedicaremos algún espacio a temas metodológicos, en particular a una discusión de lo causal, lo teleológico y lo funcional, y a los métodos cibernéticos para enfocar el análisis de los sistemas complejos adaptativos.

Y fue aplicado a los sistemas sociales también, por Buckley, en 1968 (Buckley, 1968).

Los *sistemas sociales* son sistemas interactivos, dinámicos, no lineales, provistos de un sentido teleológico, capaces de adaptación, aprendizaje e innovación y con una tendencia a estructurarse en redes complejas. Por lo tanto, deben conceptualizarse como sistemas adaptativos complejos (SAC), un concepto que emerge de la Teoría General de Sistemas, de la cibernética y de la ciencia de la complejidad.

Como sistemas teleológicos o intencionales, los sistemas sociales no pueden ser definidos simplemente por relaciones de entrada-salida como los sistemas deterministas, sino de acuerdo con los objetivos que tienen los sistemas mismos y sus componentes.

Este hecho ha sido reconocido por el economista Ludwig von Mises (1949, p. 11):

La acción humana es comportamiento intencional, es decir, la acción es puesta en operación y transformada en agencia, dirigida hacia fines y metas. Es la respuesta significativa del ego a estímulos y a las condiciones de su



entorno, es el ajuste consciente de una persona al estado del universo que determina su vida. Esta paráfrasis puede aclarar la definición dada y evitar posibles malas interpretaciones, pero la definición en sí es adecuada y no necesita comentario.

De acuerdo con Rosenblueth, Wiener y Bigelow (1950, p. 32):

El análisis del comportamiento en las ciencias sociales y de la conducta requiere introducir un método teleológico de estudio: debe ser mencionado entre paréntesis que la teoría de juegos es un capítulo en el estudio de una actividad intencional [...] la adopción de un enfoque teleológico simplifica el análisis del comportamiento dirigido a metas y amplía el campo de este análisis. Este enfoque metodológico no implica la creencia filosófica en causas finales.

Richard Taylor (1950, p. 331) discute el artículo de Rosenblueth *et al.* (1943), criticando algunas de las concepciones cibernéticas pero formulando las condiciones que deben cumplirse para considerar cualquier patrón de comportamiento como teleológico:

Yo sugiero las siguientes condiciones necesarias y suficientes para considerar cualquier patrón de comportamiento como intencional: debe haber de parte de la entidad actuante, es decir, el agente: a) un deseo, realmente sentido o no por algún objeto, evento o estado circunstancial para el futuro; b) la creencia, ya sea tácita o explícita de que una secuencia de conductas será eficaz como medio para la realización de ese objeto, evento o circunstancias y c) el patrón de comportamiento en cuestión. Esto significa que decir que un cierto patrón de comportamiento es intencional es decir que la entidad que exhibe ese comportamiento desea una meta y se comporta de la manera que cree apropiada para su logro [Taylor, 1950, p. 331].

En 1972, Russell L. Ackoff y Fred Emery, pioneros y líderes de las aplicaciones del enfoque de sistemas al diagnóstico y planeación de organizaciones, en su libro *On Purposeful Systems* (1972, p. 4) destacan:

En este libro tomamos un punto de vista holístico del comportamiento humano y por lo tanto necesariamente un punto de vista funcional, teleológico o intencional. Sin embargo, de acuerdo con Singer, Rosenblueth y Wiener, y Sommerhoff, tratamos de hacer que todos los conceptos funcionales empleados sean objetivos, medibles y capaces de ser utilizados en la experimentación como cualquier concepto estructural producido por el punto de vista mecanicista, así llamado conductista, del comportamiento humano.



Este libro desarrolla la teoría de sistemas teleológicos como un nuevo fundamento teórico de las ciencias del comportamiento: una nueva forma de ver el comportamiento humano y social, como un sistema de eventos teleológicos. Utiliza un enfoque de la teoría de sistemas para el estudio de estos fenómenos y por lo tanto ilumina y extiende la teoría general de sistemas. Trata el comportamiento intencional individual, las interacciones de individuos intencionales y grupos sociales intencionales en una forma que es complementaria al concepto tradicional mecanicista del mundo. Hace el mecanicismo y la teleología compatibles. Sin embargo, sólo el enfoque de sistemas puede manejar toda la riqueza y complejidad del comportamiento humano.

En su artículo “Towards a System of Systems Concepts” (1971, p. 667), Russell L. Ackoff define un conjunto de conceptos sistémicos incluyendo las definiciones básicas para el análisis teleológico de los sistemas complejos.

El enfoque teleológico de Ackoff ha sido adoptado y continuado por la mayor parte de los teóricos de las organizaciones. De acuerdo con Marion (1995, p. 115):

Los teóricos de la organización y los científicos sociales en general no comparten las reservas de la biología sobre la teleología convencional. Nosotros la adoptamos por numerosas razones, una de las cuales es porque deseamos sentirnos en control de nuestras organizaciones. Hay modelos completos de organizaciones construidos bajo el supuesto de que los líderes determinan el destino de sus firmas e instituciones.

Este punto de vista también es compartido por las ciencias sociales y las humanidades (Mainzer, 2007, p. 373):

En las ciencias sociales y las humanidades usualmente se distingue estrictamente entre la evolución biológica y la historia de las culturas humanas. La principal razón es que el desarrollo de las naciones y culturas está obviamente guiado por el comportamiento intencional de los seres humanos con sus actitudes, emociones, planes e ideales, mientras que los sistemas en la evolución biológica se suponen ser producto de una autoorganización no intencional [...] Desde un punto de vista microscópico observamos seres humanos individuales con sus intenciones y deseos. Inclusive en sistemas biológicos como la ecología animal hay individuos con comportamiento intencional de algún grado.

Finalmente debemos destacar que las ciencias de la complejidad social contemporáneas han incorporado la teleología y la intencionalidad en el estudio de la dinámica humana y social. En efecto, Beauteument y Broenner (2011, p. 70) se preguntan:

¿Cuál es el significado del propósito y la intención en relación con fenómenos dinámicos? Es uno muy simple que provee de una manera de perturbar las condiciones, ya sea para mover la zona o desatar un cambio de fase que traiga consigo un nuevo orden y, por lo tanto, nuevas zonas. Algunos aspectos de la realidad humana y social que son relevantes aquí incluyen los siguientes:

Un cambio intencional o de sentido no es casual. La ciencia de la complejidad provee formas de identificar la clase y el tipo de fenómenos con los que se está trabajando y provee las bases, a través de los propósitos y las intenciones, de seleccionar entre un rango de opciones las que van a sembrar, conformar e influir el tipo de emergencia a producir, de manera que lo que uno desea por anticipado sea más probable que se logre.

Por lo tanto, poner la complejidad a trabajar (en el mundo humano y social) requiere de un énfasis radicalmente diferente de los enfoques reduccionistas, y de considerar las tensiones y factores de cambio en los fenómenos del mundo real, teniendo la aptitud y la disposición de ajustarse a los cambios externos rápidamente, sin gran desestructuración interna. Habiendo explicado con ayuda de la ciencia de la complejidad los mecanismos que originan los fenómenos complejos, los expertos pueden tomar estas bases, agregar la intencionalidad y estar más conscientes de cómo y por qué pueden afectar el cambio [...]

B. Las intenciones son parte del contexto. El propósito y la intención son considerados por la ciencia de la complejidad social como modificadores de las propiedades de los componentes o de aquello que podría afectar sus interacciones, tal como el grado de involucramiento o de abstención de la gente que cambiaría los resultados del cambio. De esta forma, parte de la tarea de poner a trabajar la Complejidad, cuando todo parece diferente dependiendo de dónde se está en relación con la situación, es ser capaz de apreciar las cosas desde el punto de vista de otros actores que tienen sus propios propósitos e intenciones.

D. El modelado de procesos intencionales debe ser hecho apropiadamente. A pesar de que la gente utiliza los modelos para comunicar su forma de pensar, otra realidad es la limitada capacidad de los modelos para acomodar los propósitos y las intenciones en estos modelos.

## Dinámica de interacción social autoorganizativa hacia un orden emergente

Los sistemas sociales, según el enfoque de las ciencias de la complejidad, tienen una dinámica de interacción autoorganizativa hacia un orden emergente, con una vida propia en la que perpetuamente están construyendo su propio futuro como continuidad y transformación (Stacey, 2001). La estructura de un sistema social como red compleja adaptativa puede resumirse de la manera siguiente: el sistema social comprende un cierto número de agentes individuales. Estos agentes interactúan entre sí según reglas que organizan la interacción entre ellos a un nivel local. En otros términos, un agente es un conjunto de propiedades (variables de estado) que determinan su identidad en un momento dado, y un conjunto de reglas que determinan cómo ese agente interactuará con varios otros.

Esta interacción es local en el sentido de que no hay ningún conjunto centralizado de reglas que determinan la interacción. Las únicas reglas son las reglas localizadas al nivel del propio agente. Los agentes repiten su interacción refiriéndose a sus reglas locales, es decir, la interacción es reiterativa, recursiva y autorreferencial. Las reglas de interacción de los agentes son tales que los agentes se adaptan unos a otros. La interacción es no lineal, y esta no linealidad se expresa en la variedad de reglas y su recursión a través de los agentes (Stacey, 2001).

Una variedad continua en las reglas se genera por mutación aleatoria y réplica cruzada. *Mutación aleatoria* significa que una regla de interacción puede cambiar de un momento a otro, intempestivamente, por efecto del entorno y en forma impredecible. *Réplica cruzada* significa que dos reglas de interacción pueden asociarse, dando lugar a una sola regla, cambiando cada una alguna de sus partes para adoptar la parte correspondiente de la otra. Tanto la mutación aleatoria como la réplica cruzada son mecanismos generadores de variedad y eventual evolución que se presentan ya en la genética de los seres biológicos, pero que podemos encontrar también en la evolución de la autoorganización en los agentes sociales.

Se pueden presentar varias transformaciones de las propiedades de los sistemas interactivos con este tipo de estructura: modelos globales coherentes de orden pueden surgir de la autoorganización espontánea de los agentes cuando ellos interactúan según sus reglas locales, en ausencia de cualquier patrón global. En otros términos, las interacciones reiterativas, recursivas, no lineales construyen un atractor que expresa un patrón de interacción que da un resultado emergente. Ejemplo: la construcción de un hormiguero de termitas o de un panal de abejas. En el caso humano, la construcción de la iglesia del pueblo.

Esos atractores pueden tomar diferentes formas dinámicas que dependen del estado de parámetros importantes, particularmente: el flujo de información, el número y fuerza de las conexiones entre agentes y el grado de diversidad de los agentes. Puede haber un punto de equilibrio estable o atractores cíclicos, por ejemplo, o patrones aleatorios inestables, como los rituales de las fiestas de los santos de los pueblos.

La interacción autoorganizante entre agentes, cuando hay una rica interconexión entre los mismos, tiene la capacidad inherente de producir patrones coherentes espontáneos autoorganizados, sin ningún plan o programa centralizado (Stacey, 2001). Además, cuando las entidades interactuantes son lo suficientemente diferentes entre sí, surge la capacidad de producir espontáneamente nuevos patrones.

En rangos críticos de los parámetros surge una dinámica entre estabilidad y aleatoriedad que toma la forma de atractores caóticos (extraños) que es, paradójicamente, estable e inestable. Esto es una dinámica al borde del caos. Por ejemplo, los conflictos familiares por puntos de vista diferentes en los esposos.

En la presencia de mutación aleatoria o de réplica cruzada, los agentes y sus conjuntos diversos de reglas de interacción locales evolucionarán de una manera adaptativa. En otros términos, en la presencia de diversidad surgirán nuevos atractores. Esta evolución es sumamente imprevisible. Así, una razón para la estabilidad de los atractores al borde del caos son las interacciones redundantes, mientras que una razón para su inestabilidad es la amplificación de pequeñas diferencias.

La dinámica al borde del caos se caracteriza por una ley de potencias, lo que significa que hay un pequeño número de grandes crisis y un gran número de pequeñas crisis. Esta ley de potencias proporciona otra fuente tanto de estabilidad (en que las grandes crisis son raras), como de inestabilidad (en que ciertamente hay pequeñas crisis frecuentes). Otro factor de estabilidad son las restricciones que los agentes con sus reglas ponen entre sí, en su interacción: “sólo debe haber un mayordomo para la fiesta”, y otro factor de inestabilidad es que estas restricciones chocan entre sí: “varios jefes de familia desean ser mayordomos”. En los sistemas sociales, las reglas evolucionan de una manera emergente, así como también lo hacen las restricciones en conflicto. Entre agentes interactivos hay una coevolución.

Una visión clave de las ciencias de la complejidad se relaciona con las propiedades intrínsecas de la interacción. El modelado de sistemas complejos demuestra la posibilidad de que las interacciones entre un número grande de entidades (cada entidad respondiendo a otras con base en sus propios principios de organización local) producirá patrones coherentes con potencial para la novedad en ciertas condiciones, a

saber, la dinámica paradójica al borde del caos. Esto se ha demostrado computacionalmente con los programas de vida artificial (Gardner, 1970). En otros términos, el mismo proceso de la interacción autoorganizante, cuando hay una rica interconexión, tiene la capacidad inherente de producir patrones coherentes espontáneos, sin ningún plan o programa centralizado. Además, cuando las entidades interactuantes son lo suficientemente diferentes entre sí, surge la capacidad de producir espontáneamente nuevos patrones. Así, en los sistemas abstractos surgen patrones donde éstos tienen el rasgo paradójico de continuidad y novedad, e identidad y diferencia, al mismo tiempo, por ejemplo: el proceso circular de gesticular y responder, entre personas que son diferentes, es relacionante en forma autoorganizada, con una capacidad intrínseca de construir patrones novedosos.

### Análisis funcional de un sistema social mediante el microanálisis sintético

El estudio de un sistema complejo social adaptativo rebasa el enfoque de la física clásica que trata con sistemas cerrados, procesos reversibles, estados de equilibrio y explicaciones exclusivamente causales. En cambio, analizar un sistema complejo social adaptativo implica estudiarlo como un sistema abierto, en interacción constante con su entorno, con funciones llevadas a cabo mediante procesos irreversibles; implica también verlo afectado por estados de desequilibrio permanente y en sistemas cognitivos y sociales, así como observar las explicaciones teleológicas basadas en una intencionalidad, reflejada en un sistema de objetivos. Hay que introducir en su estudio las nociones de composición, totalidad, jerarquía, organización, y analizar los fenómenos que se dan en los sistemas como derivados de propiedades que surgen de la totalidad y no son manifiestas en el comportamiento de las partes.

El *microanálisis sintético* es un marco teórico y metodológico general introducido por Auyang (1998) en las ciencias de la complejidad, para construir sistémicamente el objeto de estudio, y en el cual los conceptos que describen los elementos y los subsistemas se interrelacionan para explicar la función, la estructura y el comportamiento de los sistemas complejos físicos, biológicos, psicológicos y sociales. Para explicar la metodología del microanálisis sintético, consideraremos que en un sistema podemos distinguir entre los estados del sistema y los estados de sus integrantes, así como entre el espacio de estados del sistema y los espacios de

estado de cada uno de sus integrantes, que serán clave en el estudio de la dinámica del sistema.

Como primer paso, hay que elaborar una macrodescripción del sistema mediante un ejercicio colaborativo, donde participen tanto el equipo de investigación como los *stakeholders* o agentes involucrados en la operación del sistema (Lara-Rosano, 2016b). Esta macrodescripción caracteriza concisamente las grandes características del sistema en términos de conceptos sistémicos. Ello condensa el universo de microconfiguraciones en unas cuantas macrovariables informativas. Su enfoque es sintético analítico. Las macrovariables utilizan macroconceptos relacionados con sistemas como totalidades, y no se refieren a sus integrantes. Las teorías utilizadas en las macrovariables se pueden llamar modelos porque dejan fuera muchos detalles, y representan los sistemas idealmente en términos de macrovariables gruesas y macrorrelaciones. Utilizando diferentes análisis de las disciplinas ligadas al problema que se investiga, se pueden construir varios modelos para el mismo fenómeno a través de un diálogo transdisciplinario. Los modelos se pueden contrastar contra la realidad mediante experimentos.

La habilidad de formular modelos demanda de los investigadores — del equipo de investigación transdisciplinario— la capacidad de penetrar la maraña de factores confusamente articulados y la miscelánea de datos empíricos, la habilidad de separar los elementos clave y representarlos mediante conceptos precisos e interrelacionados, y el sano juicio para evaluar la adecuación de los modelos. Los elementos de un sistema complejo deben interrelacionarse por niveles para explicar la función, estructura y comportamiento de este sistema, sea físico, biológico, psicológico o social.

Para aplicar el microanálisis sintético se emplean, en forma complementaria, dos procedimientos consecutivos:

- A) El *método de construcción sistémica por descomposición*, que permite abatir la complejidad del problema enfocando primeramente la totalidad y sus propiedades emergentes, descomponiendo después el sistema en una jerarquía de subsistemas funcionales identificables, hasta llegar a los componentes básicos del problema.
- B) El *método de construcción sistémica por composición* permite interrelacionar los componentes a varios niveles, comenzando por el nivel básico, para encontrar los micromecanismos responsables de producir las propiedades emergentes en cada nivel, hasta llegar al nivel de la totalidad.

## Método de construcción sistémica por descomposición

La construcción sistémica por descomposición parte de identificar en la situación problemática: el sistema focal, que es el conjunto interrelacionado de elementos de la realidad donde se da la discrepancia entre un estado real y un estado deseable; así como el entorno activo, que es la porción de la realidad que influye en el sistema focal; y el entorno pasivo, que es la porción de la realidad que es influida por el sistema focal.

Una vez identificados el sistema focal y el entorno activo y pasivo, la construcción sistémica por descomposición consiste en dos fases: el análisis de la estructura del sistema focal y el análisis de la dinámica del sistema focal.

El *análisis de la estructura del sistema focal* consiste, primeramente, en identificar el suprasistema al cual pertenece y en el que desempeña ciertas funciones que hay que identificar. Después, identificar a los sistemas del mismo nivel que el sistema focal, que pertenecen al suprasistema y con los cuales el sistema focal establece interrelaciones que también se deben identificar. A continuación se descompone el sistema focal en una jerarquía de subsistemas funcionales, definidos como agentes, y se identifican sus funciones en el sistema focal, así como las relaciones que establecen con los otros subsistemas de su mismo nivel, de manera que la operación de cada uno de ellos —y en su conjunto— asegura el funcionamiento del sistema y el logro de la función de cada subsistema dentro del sistema focal. (El empleo sucesivo de este método permite llegar a los elementos constitutivos y explicar los mecanismos de su interrelación. En el caso de sistemas sociales, estos agentes son también sistemas sociales salvo los agentes básicos que pueden ser individuos.)

Una vez que se identifica la jerarquía de sistemas y subsistemas en nuestro problema, estos elementos deben ser analizados asociándolos con la dinámica del sistema a través de la aplicación de los marcos teóricos disciplinarios a los datos.

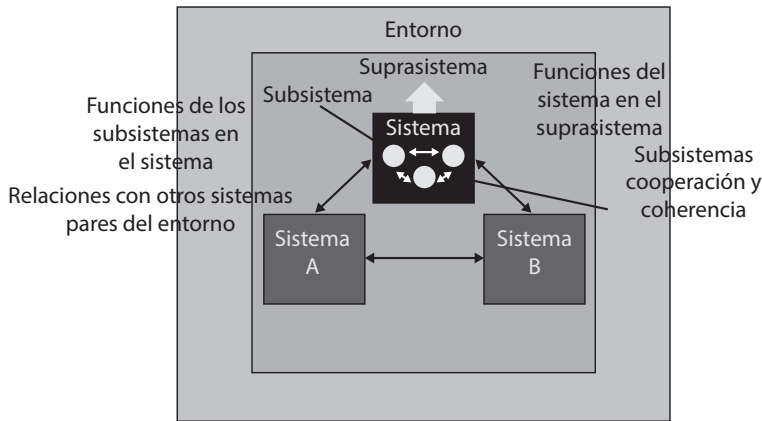
Cuando el investigador ha definido los sistemas como totalidades y reconocido su naturaleza compuesta, empieza a buscar los micromecanismos subyacentes que constituyen las microexplicaciones. Nuevamente el empleo sucesivo de este método permite llegar a los elementos constitutivos, y explicar los micromecanismos de su interrelación.

Con el fin de analizar la dinámica del sistema social es necesario identificar los objetivos que motivan los componentes del sistema para lograr una meta. En primer lugar se identifican los objetivos y funciones del sistema global y las condiciones que han de cumplir sus subsistemas de primer nivel, de modo que el sistema global logre esos objetivos y cumpla con esas funciones. Estas condiciones definen los objetivos y fun-



ciones de estos subsistemas de primer nivel (nivel de estrategia). Luego se identifican las condiciones que deben cumplir los subsistemas de segundo nivel y que constituyen los objetivos y funciones de estos subsistemas de segundo nivel (nivel táctico). El proceso se repite hasta que todos los niveles, hasta llegar al básico, estén cubiertos. Las metas y funciones identificadas en cada nivel inferior deben ser necesarias y suficientes para producir resultados emergentes que apoyen el cumplimiento de los objetivos del nivel inmediatamente superior.

FIGURA IV.3. Método de descomposición sistémica



Por ejemplo: supongamos que el problema se da dentro de una universidad. El análisis de la estructura del sistema focal consiste, primeramente, en identificar el suprasistema al cual pertenece la universidad y en el que desempeña ciertas funciones que hay que identificar. Este suprasistema es la sociedad nacional en la que se encuentra, y en ella sus funciones las prescribe su estatuto fundamental.

En seguida se identifican los sistemas del mismo nivel de la universidad, que pertenecen al suprasistema y que serían otras universidades con las cuales establece interrelaciones que también se identifican. A continuación se descompone la universidad en una jerarquía de subsistemas funcionales, definidos como agentes, que serían el subsistema de docencia, el subsistema de investigación, el subsistema de difusión cultural y el subsistema administrativo. Se identifican entonces sus funciones específicas dentro de la universidad, así como las relaciones que establecen entre ellos, de manera que la operación de cada uno de ellos —y en su conjunto— asegure el funcionamiento de la universidad y el logro de la función de cada subsistema, dentro de la misma. Luego se descompone



cada subsistema en sus subsistemas funcionales. Por ejemplo, el subsistema de docencia se descompone en el subsistema de pregrado y en el subsistema de posgrado, definidos como agentes. Se identifican sus funciones en la universidad, así como las relaciones que establecen entre ellos, de manera que la operación de cada uno de ellos —y en su conjunto— asegure el funcionamiento de la universidad y el logro de la función de cada subsistema dentro de la sociedad a la que pertenece.

El empleo sucesivo de este método permite llegar a las entidades académicas constitutivas: facultades, escuelas, institutos y centros, e identificar los mecanismos de su interrelación y, posteriormente, llegar hasta el nivel de agentes donde reside el problema que se quiere resolver.

En el caso de sistemas sociales como una universidad, estos agentes son también sistemas sociales como departamentos u oficinas dentro de la universidad, aunque pueden ser también individuos (alumnos, profesores, investigadores o funcionarios), dependiendo del problema.

Una vez definida la jerarquía de sistemas y subsistemas hay que analizarlos asociándolos con la problemática mediante la aplicación de los marcos teóricos disciplinarios que procedan, y de la información y datos disponibles.

Para ello hay que identificar los diversos tipos de agentes que intervienen tanto en el sistema como en su entorno, y el número de agentes de cada tipo. Asimismo, hay que identificar las variables de estado de cada tipo de agente y su teleología para definir su identidad.

Finalmente hay que hacer una apreciación objetiva del contexto y de los agentes incluyendo sus perspectivas y puntos de vista, para comprender el comportamiento de los agentes en su contexto, sus posibilidades y los roles que los diferentes agentes juegan: ¿por qué y de dónde surgen, y con qué propósito? ¿cómo se sostienen a sí mismos (autopoiesis)?

Naturaleza de sus vínculos, tanto internos como externos, y de sus interdependencias; su cohesión y persistencia (lo que los mantiene juntos); los valores compartidos que impulsan su dinámica; sus tipos de transiciones (cambio de estructuras, cambio de escala hacia arriba y hacia abajo), ¿en qué tipo de casos y circunstancias particulares los agentes sociales se pueden disolver?, ¿qué tipos de poder los impulsan y cómo los utilizan?; su capacidad de maniobra, grados de libertad y resistencia o apertura al cambio; sus mecanismos de control como responsabilidad, autoridad, repudio.

En la fase de construcción sistémica por descomposición se identifican en primer lugar los objetivos del sistema global con sus prioridades, y se consideran en primer término los de máxima prioridad como efectos a lograr.

Para analizar la dinámica del sistema es necesario identificar los objetivos que mueven a los agentes. Para cada uno de los objetivos se hace un análisis de sus factores causales e intencionales, con el fin de identificarlos mediante el diagrama de Ichikawa. Una vez identificados, se determina el dominio de los efectos de máxima prioridad para generar las condiciones apropiadas en sus factores, para que los objetivos (efectos a lograr) puedan alcanzarse. Esto permite definir objetivos de segundo nivel como metas a lograr. Estos objetivos de segundo nivel se consideran a su vez como efectos, determinando, para cada uno de ellos, su dominio a través del análisis de sus factores causales e intencionales, que serían objetivos de tercer nivel. El proceso se repite hasta agotar todos los niveles hasta el nivel básico.

Esta identificación tiene por objeto definir no sólo la dinámica del problema en el sistema social, sino evaluar la magnitud de las fuerzas sociales de apoyo y oposición que van a encontrarse. Así se identifican los objetivos parciales de niveles inferiores. Los objetivos de cada nivel inferior deben ser necesarios y suficientes para que se cumpla un objetivo de nivel superior como efecto emergente.

### Método de construcción sistémica por composición

Una vez que se ha completado el proceso de descomposición sistémica, el método de construcción sistémica por composición parte de considerar a detalle los agentes del nivel básico (nivel 1) y sus objetivos, que al lograrse producen conjuntamente efectos emergentes de esos agentes de nivel 1. Estos efectos emergentes contribuyen a lograr los objetivos de los agentes del siguiente nivel (nivel 2). Cuando estos objetivos de los agentes de nivel 2 se logran, contribuyen a lograr los objetivos de los agentes del siguiente nivel (nivel 3), que contribuyen conjuntamente a lograr los objetivos de los agentes de nivel 4, y así sucesivamente hasta llegar a los objetivos globales de todo el sistema que, al lograrse, resuelven el problema (Lara-Rosano, 2015).

FIGURA v.4. Diagrama del método de composición sistémica

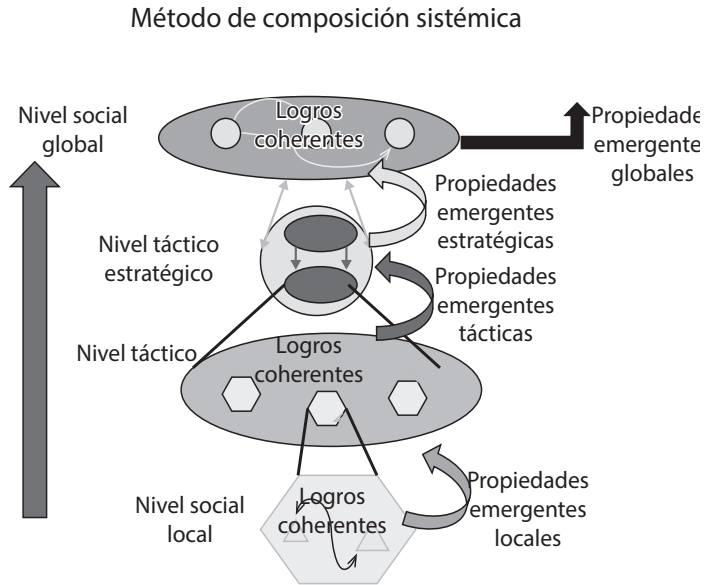
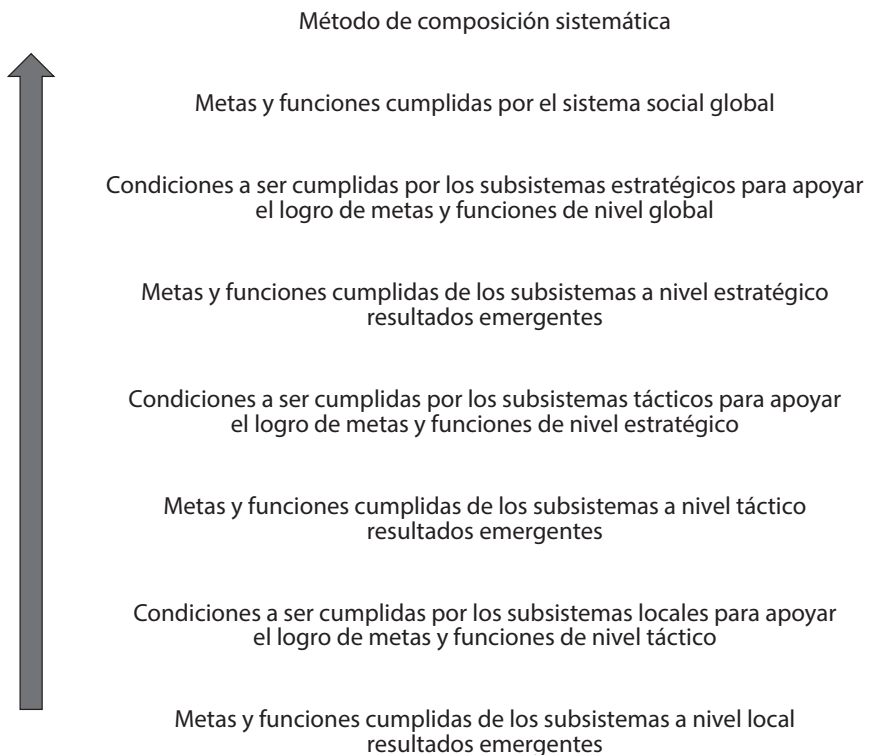
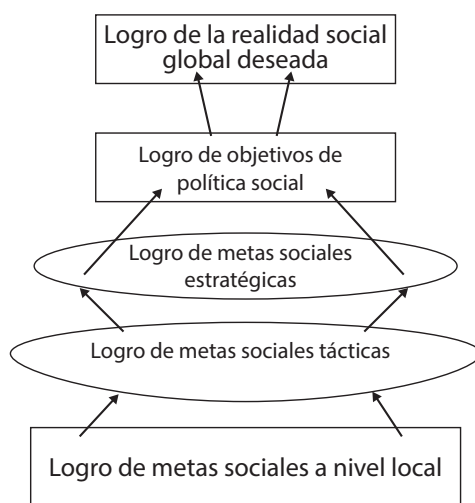


FIGURA v.5. Diagrama de bloques del método de composición sistémica



De acuerdo con Nowak (2013), la emergencia puede ocurrir en cualquier nivel. A medida que se alcanza un estado coherente del sistema en un nivel inferior, se reconoce como tal y emerge como un elemento en el nivel inmediatamente superior. Elementos de nivel superior pueden a su vez presentar coherencia, lo cual facilita la aparición de propiedades emergentes de orden todavía más alto. En teoría, estos procesos pueden continuar hasta que el sistema global como un todo se caracteriza por un único macroestado que funciona de acuerdo con un solo proceso. En la práctica, la integración progresiva se detiene en un nivel tal en el que ya falla la coherencia entre los componentes de ese nivel (Simon y Holyoak, 2002; Thagard, 1989; Nowak *et al.*, 2000).

FIGURA IV.6. Estrategia para el logro de metas a diferentes niveles



### Círculo hermenéutico en el microanálisis sintético

Una vez completada la construcción del sistema por descomposición y luego por composición en su primera versión, el equipo transdisciplinario de investigación va analizando iterativamente la realidad y sus modelos aproximados, discerniendo nuevos patrones, introduciendo nuevos conceptos e incorporándolos en mejores modelos. Con ello, precisa más y más ideas vagas y expande sus modelos para iluminar una parte cada vez más grande de la situación compleja. Éste es el círculo hermenéutico donde el significado de conceptos individuales es comprendido sólo en el

contexto del todo complejo, y el significado del todo es dilucidado a medida que sus partes son analizadas.

### Diseño y construcción de la solución como SAC

Una vez definidos los objetivos y los efectos emergentes del sistema hay que diseñar y construir un sistema social adaptativo complejo, que genere las soluciones pertinentes y las adapte dinámicamente reforzando su nivel de aptitud, para que pueda afrontar tanto los efectos de la ley de la entropía creciente, como los de las contingencias del entorno, y pueda sobrevivir y cumplir con sus funciones. Así, para minimizar los efectos de la entropía creciente, hay que generar mecanismos de eliminación de desechos degradados de autocatálisis para la producción de nuevos y mejorados elementos funcionales que reemplacen los elementos desgastados y obsoletos, así como crear mecanismos de autoorganización para elevar la aptitud contra los procesos y estructuras disipativas, y para la absorción de entropía negativa del entorno.

Por otro lado, para enfrentar las contingencias del entorno hay que generar esquemas de acción homeostática y construir atractores en las regiones del espacio de estados, que correspondan al dominio de los objetivos prioritarios perseguidos. Así, este diseño y su implementación deberá cumplir con los siguientes principios (Lara-Rosano, 2014):

Primer principio: interacción diversificada autoorganizante de los agentes del sistema focal. En la solución deben participar los diversos involucrados (*stakeholders*) en el problema, aportando sus propios puntos de vista en una rica interconexión, para tener la capacidad inherente de producir patrones coherentes espontáneos autoorganizados, sin ningún plan o programa centralizado.

Segundo principio: diagnóstico participativo de la realidad. Para definir el problema debe conocerse la situación actual haciendo interactivamente, por parte de los agentes participantes, un diagnóstico de la misma.

Tercer principio: definición participativa de lo deseable. Para completar la definición del problema debe definirse interactivamente, por los agentes, una situación deseable a la que se quiere llegar.

Cuarto principio: planeación autoorganizada de acciones. Los agentes involucrados deben proponer interactivamente, en forma guiada, medios y acciones para cambiar lo real acercándolo a lo deseado, definiendo los recursos necesarios, las estrategias de cambio, los responsables y los tiempos.

Quinto principio: las estrategias y acciones planteadas por los agentes deberán ser ejecutadas y supervisadas mediante una organización creada para el efecto, con la participación de los agentes, a la que se debe dar seguimiento autoorganizado, cuya función esencial es mantener la solución, del problema social complejo, activa y adaptativa.

## Diagnóstico crítico de instituciones disfuncionales para resolver problemas sociales

En general, todo problema complejo social (como los problemas de salud, de educación, de pobreza, etc.) se ha tratado de resolver en el pasado creando ministerios, secretarías de estado, instituciones, etc., es decir: organizaciones que han tenido la función aparente de resolver esos problemas, sin poder hacerlo, porque los diversos gobiernos nunca han sabido diseñarlas, hacerlas funcionales, darles la estructura de un sistema dinámico adaptativo, complejo, ni operarlas con eficiencia y transparencia.

Por ello, en la mayoría de problemas sociales complejos, se hace necesario —antes de proponer su solución mediante una organización dinámica, adaptativa, compleja— revisar la historia de la trayectoria de esas instituciones disfuncionales que fracasaron, para hacerles un diagnóstico organizacional dinámico bajo el enfoque de las ciencias de la complejidad, con el fin de hacer explícitas las razones políticas, técnicas, económicas, sociales, burocráticas y de corrupción que provocaron su fracaso y que debían tomarse en cuenta en un nuevo diseño sistémico.

Para ello se hace necesario realizar el análisis de la dinámica de la vieja organización y su evolución temporal a partir de un tiempo inicial, con el propósito de conocer los determinantes de esta evolución temporal.

El diagnóstico de una dinámica organizacional compleja es un proceso de investigación-acción para plantear y resolver problemas específicos de la organización, donde miembros de ésta e investigadores participan con sus percepciones y actividades organizacionales en el desarrollo de soluciones a dichos problemas, a través de un proceso de aprendizaje social. Para iniciarlo, los responsables de la gestión de la organización deben tener una percepción adecuada del contexto y del problema. Deben reconocer que no se trata de una situación de rutina, y que es necesario un nuevo enfoque que revele todas las oportunidades posibles, pero no se sabe cómo cambiar o cuáles son los costos, riesgos y beneficios del cambio (Beautement y Broenner, 2011).

El diagnóstico de la organización indica su estado actual y las discrepancias entre éste y sus objetivos, así como las causas y motivaciones de

estas discrepancias. Así, en este diagnóstico deben quedar plasmados, asimismo, los obstáculos, debilidades y amenazas que sufre la organización para aproximarse a sus objetivos, así como las fortalezas, las potencialidades y oportunidades que conjunta, incluyendo sus atractores con sus cuencas de atracción, sus bifurcaciones, sus estados caóticos, sus atractores extraños, sus situaciones al borde del caos, sus transformaciones emergentes y sus procesos o intentos de autoorganización; y debe poder estimar sus posibilidades de comportamiento futuro considerando la posibilidad de estabilidad —al borde del caos— como organización adaptativa compleja, y diversos escenarios de su entorno.

A través de una tormenta de ideas, el equipo investigador —conjuntamente con los usuarios— aporta opiniones sobre las propiedades que debe tener el sistema para mejorar su situación:

- ¿Cómo sería un sistema deseable?
- ¿Dónde radican los problemas?
- ¿Qué medidas se pueden tomar?
- ¿Qué consecuencias tendrían las medidas?
- ¿Quién está en contra y por qué?
- ¿Qué debe cambiarse?
- ¿Qué debe conservarse?

El diagnóstico es, dada su naturaleza explicativa, un elemento imprescindible en cualquier intento de mejorar la dinámica de la organización.

Independientemente del diagnóstico específico de la organización que investiga su estructura, sus funciones, su estado, su entorno, su potencialidad y su dinámica conviene comparar la organización en estudio con otras organizaciones similares, con el fin de evaluar su desempeño.

A este proceso de diagnóstico comparativo se le llama *benchmarking* y para poder realizarlo hay que adoptar un marco de evaluación común a varias organizaciones, integrado por categorías de análisis comunes e indicadores observables y medibles.

Además, hay que identificar las restricciones y los recursos que hay que aportar por parte de la comunidad, incluyendo: trabajo comunitario; fuentes de recursos financieros; ubicación de fuerza de trabajo e identificación de tecnologías alternativas, y una jerarquía de problemas a ser resueltos en el proceso de desarrollo, para calendarizar las acciones a tomar. Asimismo, hay que evaluar la factibilidad de las acciones: acciones alcanzables colectivamente, acciones alcanzables individualmente, acciones institucionales y acciones reguladas por la cultura. Finalmente, dise-

ñar la intervención: preparación de la intervención dependiendo del contexto, dando forma y adaptando las prácticas sociales actuales.

## Metodología para resolver un problema social complejo

La solución de un problema social complejo requiere la intervención de cuatro tipos de agentes:

a) El usuario que es el sujeto individual o social que tiene el problema y que percibe la discrepancia entre una situación real y su deseo.

b) Los terceros involucrados que están en la situación del problema y pueden ser afectados por su solución, a través del cambio de la situación problemática o del usuario.

c) El decisor, que está en la situación del problema y tiene la facultad, el poder y los recursos para tomar decisiones que cambian la situación del problema.

d) El asesor, que es el equipo de investigación, está en la situación del problema, lo identifica y sugiere alternativas de cambio de la situación o del usuario para resolverlo.

En consecuencia, la solución de problemas sociales complejos implica la elaboración de un análisis sistémico adecuado, de acuerdo con el problema específico que se intenta resolver.

La solución de un problema social requiere tres fases:

- 1) Definición del usuario, del sistema, de su entorno, de los enfoques de las ciencias de la complejidad aplicables, y construcción del modelo conceptual y, eventualmente, de un modelo computacional del problema. Es imprescindible identificar primeramente al sujeto que tiene el problema, que puede ser un individuo, un colectivo, un sistema social, etc., porque en función del sujeto es que se define el problema como discrepancia entre una realidad y lo que el sujeto desearía tener como realidad específica. También hay que identificar las disciplinas de conocimiento que tienen que ver con el problema, para constituir el equipo transdisciplinario de investigación. A continuación, hay que definir el sistema, que es la fracción de una realidad compleja donde se origina el problema, así como el entorno constituido por porciones de la realidad que influyen en el sistema o bien que son influidas por él. En tales consideraciones, hay que tomar en cuenta que el problema a resolver es el que dicta tanto las dimensiones a tomar en cuenta en el sistema, como en el entorno. Sobre esta base se definen las variables que deben considerarse en el análisis sistémico y se emprende el análisis del siste-



ma, aplicando la metodología del microanálisis sintético por descomposición y por recomposición, para construir el modelo conceptual del problema. Estas actividades deben ser el producto de talleres participativos en los que intervenga tanto el equipo de investigación como el sujeto que tiene el problema.

- 2) Diagnóstico del problema y planeación de la solución. Con el auxilio del modelo conceptual y eventualmente de un modelo computacional, se hace un diagnóstico participativo de la realidad y una definición participativa de lo deseable, para disminuir su discrepancia integrando al usuario en estos procesos. Sobre este diagnóstico se definen las acciones de cambio deseables y factibles para resolver el problema, que tienen que definirse mediante una interacción guiada diversificada autoorganizante, que integre una planeación autoorganizada de acciones.
- 3) Implantación y seguimiento de la solución. El proceso de solución debe ser dinámico construyendo un SAC mediante un procedimiento de autoorganización de los usuarios, guiado por el equipo investigador para ser operado por los usuarios. Este SAC será una organización específica, con la capacidad de enfrentar el contexto complejo de forma apropiada y dinámica, evaluando y adecuando su aptitud frente a la complejidad. Para ello, habrá que definir un estado deseable y construir ahí un atractor situado en el horizonte de planeación, hacia donde converja el sistema en virtud de su dinámica interna. Para que esto sea factible hay que encontrar la cuenca de la solución y llevar al sistema actual hacia esa cuenca de atracción mediante acciones de intervención para que, a partir de ahí, la dinámica del sistema lo lleve a la solución. Esto implica conocer el sistema y conocer su contexto.

Con ello, el diseño e implementación de una organización adaptativa que resuelva en forma colectiva y dinámica un problema social complejo, creará y reforzará valores sociales en la comunidad usuaria que estimulará el desarrollo de ésta con más autonomía, sentido de colaboración, cohesión social, educación, equidad y responsabilidad social.

## Sistemas con colectivos

Un *colectivo* se forma del comportamiento coherente de un grupo de integrantes fuertemente interactuantes. Tiene una fuerte cohesión interna y un débil acoplamiento externo, y sus propiedades y relaciones causales pueden ser conceptualizadas independientemente de sus participantes, por ejemplo, el sistema político. El análisis de colectivos investiga la estructura interna de los colectivos y las relaciones entre ellos. El análisis de

sistemas investiga las contribuciones de los colectivos al comportamiento del sistema como un todo.

Los colectivos se forman en sistemas multiindividuos que no son homogéneos, donde un grupo de integrantes se puede acoplar más fuertemente entre sí que con los demás, compactando el grupo y formando el colectivo (Auyang, 1988).

Otros grupos se forman similarmente. Así, en sistemas con un gran número de individuos interactuantes, las menores inhomogeneidades o fluctuaciones pueden conducir a estructuras complejas. Un colectivo agrupa a varios integrantes del sistema y un integrante puede participar en varios colectivos, por lo que el colectivo es una categoría especial de subsistema. Un colectivo puede tener estructuras internas complicadas e incluso presentar conflictos entre sus participantes, pero externamente aparece como una unidad integral e interactúa como una unidad con otros colectivos y con integrantes aislados. Un colectivo tiene un carácter transitorio y es fluido y dinámico formándose y disolviéndose a medida que sus integrantes se congregan y se dispersan (Stacey, 2001).

Los sistemas con colectivos tienen cuatro elementos: el ambiente externo, el sistema, los colectivos y los integrantes.

Las relaciones de acoplamiento son las que definen las interacciones y se pueden establecer entre los integrantes, entre los colectivos, y entre los integrantes y los colectivos. Las relaciones composicionales son las que definen la estructura de un sistema mayor en función de sus componentes, y se pueden establecer entre el sistema y los colectivos, entre el sistema y los integrantes, y entre los colectivos y los integrantes.

En el análisis de colectivos tratamos de encontrar sus propiedades, el comportamiento de sus participantes y la relación entre el colectivo y los participantes. El análisis de sistemas trata a los colectivos como individuos en un nuevo problema multiindividuo, en el que se determina su contribución al comportamiento del sistema. Un colectivo puede contribuir a muchas propiedades del sistema y una propiedad del sistema puede involucrar muchos tipos de colectivo.

Por otro lado, para fines de mejorar el control del sistema ante los cambios en el entorno, se pueden fortalecer los acoplamientos entre los colectivos, lo que da lugar al fortalecimiento de una cultura organizacional.

## El efecto estabilizador de los colectivos: una analogía de las ciencias de la complejidad

La formación de colectivos es la organización de agentes en subgrupos donde el número de conexiones entre agentes dentro de un colectivo es alto, pero el número de conexiones con agentes en otros colectivos es bajo. En otros términos, la formación de colectivos reduce el número de conexiones del sistema entero y, así, tiende a estabilizarlo bastante para evitar la destructividad de una dinámica muy inestable. Un sistema se estabiliza por su capacidad de organizarse en colectivos, para así reducir el número global de restricciones conflictivas (Kauffman, 1995).

Kauffman habla sobre la formación de colectivos como un proceso espontáneo en que se forman grupos de fuertes conexiones, dentro del colectivo, y conexiones débiles con otros colectivos cuando los sistemas se autoorganizan al borde del caos.

Es en este último sentido en que la formación de colectivos es una analogía para la organización humana. Aquí, la formación de colectivos significa que cada grupo de agentes sigue sus propias actividades, ignorando el efecto en otros grupos y sólo débilmente afectado por las actividades en otros colectivos, a pesar de que todos ellos son toda parte de una interacción más amplia de la que depende su supervivencia. Kauffman demuestra que este tipo de arreglo puede producir patrones bastante coherentes de autoorganización, viables en ausencia de cualquier plan centralizado. Las interacciones que se agrupan de esta manera es más probable que produzcan patrones bastante estables.

## Agrupándose en las organizaciones

Desde la perspectiva de la corriente tradicional, la conclusión alcanzada arriba es muy contraintuitiva. Normalmente se piensa que las agrupaciones de personas de una organización —que atienden principalmente a sus propios fines, mientras que ignoran su impacto en la organización global— la dañarán. Sin embargo, una organización que consiste en grupos que hacen su propia cosa, mientras prestan una poca pero no demasiada atención al resto, es más estable que estar todos conectados, tratando siempre de tomar en cuenta el impacto de sus acciones en el todo (Bentley, 2000). El arreglo de colectivos es más estable y tiene el potencial para un orden emergente, mientras que estructuras altamente interconectadas son desestabilizantes, con potencial para el desorden.

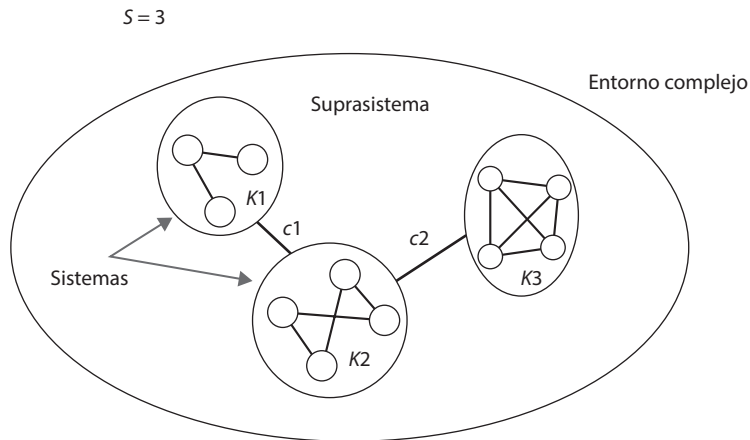
Esto tiene implicaciones importantes para las organizaciones. Normalmente se piensa que deben desarrollarse políticas y planes para cubrir los sistemas completos. La analogía de los colectivos sugiere que este enfoque de sistemas totales no sólo puede ser innecesario para la producción de una acción coherente, sino que realmente podría ser desestabilizante y producir, en cambio, incoherencia.

Stacey (2001) afirma que la institucionalización del proceso de interacción comunicativa humana, entre las personas, debe orientarse a una forma de agruparse en colectivos. La analogía de formación de colectivos sugiere que el proceso social puede ser uno que pauten la interacción comunicativa de grupos, con fuertes interconexiones, vinculados a otros grupos a través de vínculos débiles. Tales grupos de fuertes conexiones podrían constituir instituciones y organizaciones estructuradas en grupos, con fuertes conexiones internas y con vínculos débiles con otros, como departamentos y equipos de proyectos en la organización.

### Colectivos suprasistémicos (redes sistémicas)

Consideremos ahora un conjunto de  $S$  colectivos, del 1 hasta el  $S$ , cada uno  $i$  formado por un conjunto de  $N_i$  agentes interrelacionados, con un grado de acoplamiento interno de  $K_i$ . Consideremos que estos  $S$  colectivos forman una red sistémica, con una interdependencia  $C$  que mide el número de características en un colectivo que responden a cambios en los otros colectivos. Por ejemplo, la Comunidad Europea sería una red sistémica constituida por un conjunto de  $S$  países, y cada uno formado por  $N_i$  regiones y con un acoplamiento interno  $K_i$ , siendo  $C_i$  el número o la intensidad de características en un país  $i$  que responden a cambios en otro país de la red.

FIGURA IV.7. Colectivos suprasistémicos



Hay una dinámica entre los colectivos de la red que compiten por recursos. Hay dos puntos extremos en esta competencia entre colectivos: *a)* el punto de la *Reina Roja* (nombre tomado de *Alicia en el País de las Maravillas* de Lewis Carroll), en el que hay una lucha de colectivos de todos contra todos, sin que nadie gane; *b)* el punto del *equilibrio nash*, en el que al final de la lucha eventualmente los sistemas llegan a un compromiso y se estabilizan. Los sistemas aptos existen entre estos dos extremos, en un punto que se puede llamar el *equilibrio nash dinámico*, que está en el borde del caos.

Si la interdependencia  $C$  entre colectivos es alta, un pequeño cambio en un colectivo deforma y desestabiliza el paisaje de los colectivos con los que se relaciona. Si el número  $S$  de colectivos en red es alto y los colectivos tienen una baja complejidad interna  $K$  la situación puede derivar en el punto de Reina Roja y se estimula la inestabilidad y el caos, porque las restricciones conflictivas internas, que pueden ser ordenadoras, desaparecen y se favorece la anomia y el desorden. En la práctica, un gran número de colectivos tiene dificultad en encontrar compromisos estables entre ellos, por ejemplo, los cárteles mexicanos de las drogas.

Por otro lado, una alta complejidad interna  $K$ , en combinación con una baja interdependencia  $C$  y pocos colectivos  $N$ , conduce a la estabilidad nash, por ejemplo, los países latinoamericanos que en más de un siglo no han estado en guerra entre sí.

El tiempo de espera para llegar a un equilibrio nash es breve cuando la complejidad  $K$  de los participantes es alta, en relación con el efecto de

interdependencia  $C$  que unos tienen sobre otros. En efecto, redes con colectivos con alta complejidad interna  $K$  y baja interdependencia  $C$  tienden a ser estables. En cambio, redes con colectivos con baja complejidad interna  $K$  y una alta interdependencia  $C$  tienden a ser caóticas. Sin embargo, estos colectivos con baja complejidad interna  $K$  se benefician de la competencia con participantes complejos. Después de llegar al equilibrio nash, los participantes menos complejos son más aptos. La mejor estrategia es adoptar una estructura con complejidad interna baja en  $K$  competir contra participantes con alta complejidad interna  $K$ , llegar al equilibrio nash y luego dominar el panorama. Si el número  $S$  de colectivos es grande, el tiempo para llegar al equilibrio nash aumenta y la aptitud media de los sistemas disminuye.

Cuando se empieza a construir una red sistémica, los colectivos pueden entrar y salir porque la aptitud de la red es baja y puede haber invasiones y grandes avalanchas de cambios.

Sin embargo, cuando la red madura, las nuevas invasiones son más difíciles porque los invasores tienen dificultades de sobrevivir en la red suprasistémica consolidada. La aptitud de la red llega a su máximo, y los de fuera no pueden entrar. Esto pasó con los imperios hegemónicos del siglo XIX, Inglaterra, Francia, Portugal, Turquía y Holanda, que dominaron el mundo y dejaron ya muy pocos territorios coloniales para Alemania e Italia. En este caso, los intrusos lo tienen difícil: no han aprendido los roles, su complejidad interna es equivocada, sus estrategias competitivas están fuera de lugar, y es improbable que puedan competir e invadir a la red.

Cuando un miembro desaparece o cuando intrusos entran a la red, la membresía absorbe el evento debido a su aptitud y su robustez. Se puede producir un pequeño deslizamiento, pero controlable. En efecto, cada colectivo de la red sistémica ha encontrado un nicho viable que no amenaza la aptitud de los otros colectivos. Han aprendido cómo sobrevivir en el nicho y en la comunidad. Tanto la red como los colectivos han evolucionado hacia al borde del caos.

No obstante, en virtud de la ley de potencias de las perturbaciones, puede venir alguna perturbación excepcional que pueda abrirse paso en toda la red, hasta provocar una catástrofe. Es el costo de la aptitud y de estar en el borde del caos. Es, por ejemplo, el caso de la aparición del fascismo en la red de la Liga de las Naciones, en los años treinta del siglo XX, que provocó la segunda Guerra Mundial.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Este trabajo fue parcialmente patrocinado por el Conacyt, a través del proyecto 152 008.

## APÉNDICE. INTRODUCCION HISTÓRICA AL PENSAMIENTO COMPLEJO

Alejandro Gallardo Cano

### Introducción

Cualquier fenómeno histórico-socio-cultural que se desee conocer revela a quien lo observa y estudia una gran complejidad. Sobre esto prácticamente no hay discusión en los tiempos que corren. La profusión de disciplinas científicas que han estudiado a la sociedad humana con sus escuelas, corrientes y enfoques diversos, son prueba de esa condición: los hechos humanos, los procesos sociales, la sociedad misma es compleja. Por supuesto que esta característica, la complejidad, no es imputable solamente a las sociedades humanas, sino a la naturaleza misma. En una visión amplia, general, la sociedad humana no es más que una manifestación de organización singular que de ninguna manera puede desligarse del entorno vivo y físico que integra la naturaleza.

“La realidad no es algo que exista sólo en un nivel, sino en muchos, al mismo tiempo.” (Nicolescu, 1996: 12.)

Lo anterior es una forma directa de afirmar el carácter interdependiente de todo aquello que percibimos e identificamos como la realidad. Ni los humanos, ni los animales, ni cualquier estructura viva dejan de ser interdependientes, así sus conexiones no sean aparentes o no sea posible establecerlas en primera instancia. Y lo mismo ocurre con otros fenómenos, no necesariamente vinculados con organismos vivos.

La realidad perceptible para la consciencia humana es compleja y *complejidad* es un término que describe a la realidad y engloba una gran variedad de aspectos. Cada uno de ellos abarca, a su vez, fenómenos complejos difíciles de aprehender. No es fácil describirla. No se la define en unas cuantas palabras. No es fácil estudiarla. Al menos, es imposible avanzar en su comprensión y explicación si no se apela a formas novedosas de racionalidad y de investigación.

De esto ya se tenía intuición, cuando menos, a inicios del siglo pasado, como lo revela el aporte de numerosos y notables pensadores. Karl R. Popper, Ludwig von Bertalanffy, Warren Weaver, Norbert Wiener, Erwin Schrödinger, Claude E. Shannon, Niklas Luhmann, Roger Penrose, entre muchos otros, desde puntos de vista y especializaciones diferentes, comprendieron tempranamente que, para alcanzar una cabal compren-

sión de la realidad compleja, era preciso desarrollar una nueva forma de pensar y una nueva forma de investigarla. En una visión contemporánea, entonces, la realidad no puede ser considerada como un “algo” compuesto por partes o estancos aislados entre sí.

Para reconocer, identificar y comprender tal complejidad se requiere lo que ya está ocurriendo desde hace algún tiempo y que será examinado con más detenimiento en este apéndice: dejar de pensar unidimensional o linealmente y, además, crear las herramientas que permitan entender esta realidad construida por relaciones de interdependencia no limitadas a un solo “plano relacional”, sino a múltiples interdependencias que ocurren entre las entidades de todo tipo en el tiempo y en una especie de plano multidimensional que eleva, a su vez, el ejercicio del análisis y la descripción a un alto nivel de complejidad.

Esa es precisamente una de las características del llamado *enfoque de los sistemas complejos*, o como algunos autores identifican a este campo de conocimientos en convergencia: *ciencias de la complejidad*. Así, nos encontramos con esfuerzos explicativos que apelan a la colaboración entre múltiples disciplinas y retoman en buena medida los procedimientos desarrollados por la filosofía (cuyos métodos siempre han sido de corte holístico), de la biología, de la matemática, la física y aún de la literatura, para describir y pensar a la realidad de una forma no fragmentaria, sino totalizadora. Lo mismo pueden encontrarse metáforas holográficas que enfoques ecológicos encaminados a la adquisición de una nueva racionalidad, una epistemología diferente de conocer a través de una *metaciencia*, o nueva ciencia de todas las ciencias (Capra, 2002, p. 37).

Muchos pensadores provenientes de distintas disciplinas, gradualmente han construido en las décadas recientes propuestas orientadas a buscar una nueva organización de la ciencia encaminada a reducir aquello que Bateson describiera como la *diáspora disciplinaria* (en Capra, 2002, p. 56), nacida de la tradicional segmentación reduccionista característica de la ciencia positiva clásica.

## Mirarlo todo desde todos lados

La siguiente cita ilustra perfectamente la forma kantiana clásica de organización parcelaria de la ciencia contra la cual se reacciona ahora; una visión de tipo analítico reduccionista, que incluso ha determinado la forma de organizar los centros de investigación y enseñanza en todo el mundo a lo largo de por lo menos dos centurias:



En el campo de las ciencias —dice Wiese— debe regir una clara división del trabajo. Que cada ciencia labre su propio huerto; que consienta en hacer participar de sus frutos al vecino; y que, a su vez, solicite de éste la semilla que necesite; pero cada disciplina requiere su propio suelo, tiene su propia labor que realizar” (citado en Recasens, 1978, p. 75).

Formas de fragmentación del conocimiento donde la gran división entre ciencias del espíritu y ciencias de la naturaleza propuestas por Wilhelm Dilthey gravitan sobre la generación del conocimiento actual. Pero no sólo la parcelación de las áreas del conocimiento es característica de la ciencia “clásica”; también las formas de enfrentar los hechos, fenómenos y procesos de la naturaleza y la sociedad están en vías de transformarse. Buena parte del desarrollo del conocimiento científico clásico, se basa en el estudio de los fenómenos “por sus partes”: Un desmenuzamiento de aquello que se estudia para poder comprenderlo.

Sin embargo, como señala Lara Rosano<sup>1</sup>, en muchos fenómenos de la naturaleza y la sociedad, proceder de esa manera impide el aperecibimiento de ciertos aspectos y manifestaciones que surgen de esos fenómenos y que no pueden ser detectados si se procede analítica o de forma “reduccionista”. Para abandonar este modelo clásico de pensamiento, argumenta Nicolescu, es necesario acudir a la transdisciplina, cuyo punto de vista, como de ojo de mosca, permite considerar la realidad multidimensional. Se trata entonces, de abandonar en principio la organización tradicional de la ciencia, la parcialización y el reduccionismo en aras de la inter e intra colaboración entre múltiples disciplinas o ramas de la ciencia para abordar de manera más integral los problemas que plantea la complejidad.

Y es que la naturaleza y la sociedad humana son una. Segmentarlas para estudiarlas mejor es una buena estrategia de trabajo (que indudablemente ha traído beneficios a la humanidad), pero se corre el riesgo de creer que la realidad se divide en los anaqueles o estancos en que suele acomodarse el conocimiento adquirido sobre ella. Lo artificial de esta división se manifiesta cuando se definen los límites entre disciplinas, (hay muchos ejemplos de esas fronteras “borrosas”, artificiales o inexistentes), o cuando se intenta abordar fenómenos que no son simples, sino complejos, plétóricos de relaciones de naturaleza química, biológica, política, comunicativa, ecológica, etcétera.

<sup>1</sup> Todas las citas de este apéndice relacionadas con Felipe Lara Rosano, provienen de sus cátedras impartidas en el Seminario de Métodos y Modelos de la Complejidad Social, CCADET, UNAM, 2010-2013.

De igual forma, pensar la complejidad implica abandonar la idea de que los problemas sociales y los fenómenos en la naturaleza son generados por conexiones simples en ciclos absolutamente predecibles de causa-efecto donde todo fenómeno tiene una causa, y dos causas iguales, tienen idénticos resultados; o con base en relaciones lineales directas y unidireccionales, a la manera del pensamiento influido por el determinismo clásico de Newton (que tiene sus antecedentes en Copérnico, Kepler, Galileo, Bacon y Descartes), que consideraba al mundo físico como un mecanismo donde las partes del mismo se comportan de acuerdo con leyes universales. Descubrir esas leyes, desde tal punto de vista, equivale a explicar y predecir al mundo físico y ese es precisamente el objeto de las ciencias: descubrir esas leyes mediante la investigación empírica y el método hipotético-deductivo, la cual está perfectamente ilustrado en esta cita que Melanie Mitchell nos ofrece de René Descartes (Mitchell, 2009: XIX):

...para resolver las dificultades de la mejor manera, es preciso dividir las y examinarlas en tantas partes como sea posible... [y] para llevar a cabo mis pensamientos en ese mismo orden, empiezo por los objetos más simples y más fáciles de entender, y ascendiendo gradualmente, por así decirlo, paso a paso, hasta arribar al conocimiento de los más complejos.

Dicho procedimiento es conocido como reduccionista o analítico, porque descompone la entidad, proceso o fenómeno bajo estudio en sus partes más pequeñas y estas a su vez en sus partes más pequeñas hasta llegar a los componentes fundamentales. De esta manera, el funcionamiento del mundo físico se explica a partir de la descripción del comportamiento de las partes: *el todo es la suma de sus partes*, y donde el estado natural de los fenómenos es el equilibrio. Ello implica que el cambio de un hecho o fenómeno es equivalente al de un mecanismo de relojería cuyo movimiento es predeterminado y hasta predecible. Ello otorga al tiempo un sentido irrelevante.

La observación ordenada y rigurosa de los fenómenos de la realidad, tanto de la estabilidad cuanto del cambio, la formulación de hipótesis y su comprobación empírica o por métodos formales (matemáticos), constituyen la esencia del método científico en su forma clásica y es un paradigma que ha determinado la forma de organizar y obtener el conocimiento moderno, y como se dijo, aún las universidades y centros de estudio de todo tipo acusan una influencia marcada por este modelo. La física no ha sido la única ciencia organizada de esta forma. Un rápi-

do vistazo a las grandes teorías de la psicología, la economía y las ciencias sociales permite detectar sin dificultades los componentes del paradigma clásico newtoniano.

Entre las críticas que se enderezan en la actualidad en contra de este paradigma, es que, al desagregar las partes hasta sus últimos componentes para estudiarlos, no se logran explicar propiedades emergentes que sólo pueden ser comprendidas si se mira el todo en su conjunto. En consecuencia, al tratar de solucionar un problema a través del estudio de las partes con ese enfoque, se incurre en el error de buscar el problema en los elementos o partes, cuando generalmente está en las relaciones entre ellas.

Al utilizar un enfoque reduccionista para estudiar sistemas y fenómenos complejos, apunta Lara Rosano, se omite la relación entre los agentes o partes de un objeto y cómo unas dependen de otras, las cuales, a su vez, dependen de las primeras, lo que da origen a relaciones no lineales propiciadas por la retroalimentación. En el devenir de esta forma de relación, aparecen propiedades emergentes que originalmente no tenía ninguna de las partes. Los problemas y procesos naturales y socioculturales que constituyen la realidad evidencian, además de esas relaciones no lineales, fenómenos de autoorganización que derivan en momentos de estabilidad efímera, no permanente.

### **Cambio, unidad, inestabilidad, emergencia: las propiedades de la realidad compleja.**

Cuando se habla de la realidad compleja es imposible no considerar a una gran cantidad de fenómenos, procesos o elementos participantes vinculados por densas urdimbres de relaciones, que muestran fenómenos de emergencia novedosos, suscitados por una rara combinación de interacciones causales y teleológicas y que provocan, a su vez, una inestabilidad perpetua al conjunto al que pertenecen. “Nubes” de elementos o agentes que se mantienen siempre en un equilibrio precario entre el orden y el caos. Son conjuntos —muchos de ellos, de naturaleza distinta— interactuando entre sí en múltiples planos, formas y con propósitos divergentes, que se distinguen gracias a su permanencia durante algún tiempo y debido a procesos internos de autoinformación y autoorganización; y que, por todos esos aspectos, se comportan de maneras novedosas e impredecibles y... todo ese coctel es, precisamente, la composición íntima de la realidad compleja.

Así, cuando se habla de fenómenos o sistemas complejos, siempre se hace alusión a “estructuras” efímeras o dinámicas que de una u otra manera están relacionadas con múltiples aspectos de la realidad. Es decir, con otras estructuras dinámicas y mutables. Es una multidimensionalidad que no encontramos en fenómenos que caracterizamos como simples o sencillos. Pareciera ser que esas dinámicas de elementos identificados como sistemas independientes, se “intersectan” con otros muchos procesos y elementos de otros sistemas, de manera que no resulta fácil establecer sus relaciones específicas. Este es el entorno en que vivimos. Así ha sido siempre.

Dado que a lo largo de este apéndice haremos continua alusión a la “realidad compleja” (pues se intenta arribar a una propuesta de solución de problemas de la realidad compleja social, conviene hacer una relación más precisa de eso que se llama *realidad*. Para ello aprovecharemos una sucinta relación que nos ofrecen diversos autores, como Mainzer (2007) y Mitchell (2009).

Considerar estos aspectos de la realidad compleja nos ha llevado en los albores del siglo XXI al fomento de una nueva ciencia o una nueva forma de generar conocimientos o, por lo menos de comprensión de aquello que llamamos realidad sin apelar a la percepción ingenua o al sentido común, porque gradualmente se generaliza, por parte de las ciencias naturales y sociales, el reconocimiento de que

...los principales problemas de la humanidad son globales, complejos, no lineales y, frecuentemente, también aleatorios. Cambios locales en los sistemas ecológicos, económicos o políticos pueden causar crisis globales. El pensamiento lineal y la creencia de que el todo es sólo la suma de las partes es evidentemente obsoleta (Mainzer, 2007, pp. 1-7).

Y si la meta es acelerar la transición hacia una forma de racionalidad no determinista y superar la visión de la ciencia clásica centrada en la omnipresencia de la repetición, la linealidad, la estabilidad y el equilibrio, es preciso desarrollar y afinar herramientas conceptuales precisas para describir la inestabilidad que está por todas partes, detectar la evolución hacia estados novedosos y reconocer las fluctuaciones presentes no sólo en la naturaleza, sino en la sociedad humana. Un punto de vista metateórico no positivista, ni reduccionista sino holista. Una de esas herramientas es la transdisciplina.

En los siguientes esquemas se ofrece una visión sintética de la forma en que el conocimiento científico ha enfrentado a la realidad, y cómo tiende a integrarse considerada la transdisciplina. En el tercer ejemplo,

elaborado por Bar-Yam Yaneer, se sugiere como línea rectora el estudio de los sistemas complejos, puesto que dichos sistemas presentan evidentes propiedades universales, lo que permite el desarrollo de herramientas que gradualmente pueden ser de uso generalizado.

Según Mainzer, el desarrollo de métodos para la comprensión de sistemas complejos no lineales —como hemos identificado de entrada a la realidad social, plétórica de problemas económicos, societarios y políticos difíciles de abordar con los enfoques reduccionistas tradicionales y su tratamiento mediante el análisis teórico tradicional—, implica el fomento a la cooperación transdisciplinaria entre ámbitos del conocimiento tradicionalmente disociados como son las llamadas ciencias naturales y las sociales, con sus formas particulares de observación, experimentación y propuestas teóricas (Mainzer, 2007, p. 13). ¿Pero qué debe entenderse por transdisciplina y cómo se llega a ella?

### La transdisciplina: comunicación entre campos diversos del conocimiento.

Para lograr una colaboración transdisciplinaria, señala Nicolescu, es necesario establecer conexiones y formalizar acuerdos entre diferentes campos del conocimiento, según el problema que se enfrente de la realidad; ello implica crear puentes entre las disciplinas que normalmente no se comunican. Esto no implica desdeñar o confrontar las investigaciones y logros de la ciencia unidisciplinaria, sino de aprovecharlos y potenciarlos de una novedosa forma: fusionar esos hallazgos y procedimientos de investigación bajo un principio de complementariedad con el propósito de comprender el mundo presente “en el cual uno de los imperativos es la unidad del conocimiento” (Nicolescu, 1996, p. 35).

¿Cuál es la ventaja de este enfoque transdisciplinario respecto de las otras formas conocidas de colaboración entre los campos disciplinarios o ciencias específicas? Para evitar incurrir en equívocos entre los conceptos de unidisciplina, pluridisciplina e interdisciplina, Nicolescu comienza por establecer el rango y alcance de la palabra *transdisciplina*. La partícula “trans”, señala aquello que está al mismo tiempo “entre”, “a través” y “más allá” de las disciplinas o áreas de la ciencia conocida.

Si la pluridisciplinariedad implica analizar el objeto de estudio atribuido a un área específica desde múltiples ángulos pero sin alterar la estructura de la investigación, y la interdisciplinariedad se caracteriza por hacer la transferencia de métodos entre disciplinas, entonces la transdisciplina implica esas acciones (comprensión de un fenómeno desde múlti-

ples vías y transferencia metódica), pero va más allá, pues aspira a vencer la fragmentación del conocimiento y la híperespecialización al posibilitar la generación de nuevas disciplinas.

Superar la unidimensionalidad del pensamiento clásico disciplinario implica, entonces, considerar una realidad multidimensional, estructurada por varios ámbitos o niveles de realidad. Aquello que hemos tratado de describir como la realidad compleja o, más precisamente, las complejas realidades del mundo actual o realidad multidimensional. Se pueden distinguir, en síntesis, tres grados de interdisciplinariedad, según Nicollescu (1996, p. 36):

- a) grado de aplicación
- b) grado epistemológico
- c) grado de generación de nuevas disciplinas

El primer caso se ejemplifica con la transferencia de los métodos de la física nuclear hacia la medicina, que han conducido a la aparición de nuevos tratamientos del cáncer. El segundo, puede ilustrarse con la transferencia de los métodos de la lógica formal en el derecho hacia la epistemología del derecho. Por último, en el tercer caso, la generación de nuevas disciplinas puede ejemplificarse con el surgimiento de la física matemática como resultado de la transferencia de los métodos de la matemática a la física, o la cosmología cuántica, resultado a su vez de la metodología de la física de las partículas hacia la astrofísica. O en el caso de la teoría del caos, la cual ha surgido a partir de la colaboración metódica entre la matemática y el estudio de los fenómenos meteorológicos (Nicollescu, 1996, p. 37).

En la presente investigación, así sea en grado de tentativa o ensayo, están presentes por lo menos dos de esos grados y la aspiración de replanteamiento de una disciplina inmersa en una aporía.

## La realidad multidimensional y la lógica multivaluada: factores de la transdisciplina

La existencia de un único nivel de la realidad es uno de los dogmas filosóficos fuertemente cuestionados por la física cuántica y uno de sus principales aportes al pensamiento contemporáneo, señala Nicollescu (1996: pp. 18 y 38-41) y la existencia de una realidad multidimensional nos obliga a abandonar el pensamiento lineal clásico.

Como se sabe, las leyes del mundo cuántico no se corresponden con las del mundo macrofísico. En el mundo de las partículas subatómicas algunas de ellas parecen quebrantar la lógica tradicional y tienen la facultad de estar en dos o más lugares al mismo tiempo, e incluso interactuar entre ellas, mientras que en el mundo “macro” esto es imposible. Ambos niveles de realidad parecen regirse por principios o leyes distintos, lo cual no les impide coexistir. Pruebas de ello abundan. El comportamiento de la luz como corpúsculos o como ondas, o la existencia de formas de organización complejas —como el ser humano y los entes biológicos de todo tipo

Una materia más fina penetra una materia más gruesa. Las dos coexisten, cooperan dentro de una unidad que va de la partícula cuántica al cosmos (Nicolescu, 1996, p. 16).

Esto implica, desde una perspectiva transdisciplinaria, que no sólo es posible sino necesario elaborar explicaciones del mundo y de los fenómenos desde diferentes ámbitos o niveles de realidad, porque no se puede explicar todo con los mismos términos lógicos. De acuerdo con este punto de vista no existe un ámbito o nivel de realidad privilegiado desde donde se puedan entender todos los otros niveles, sino que todos coexisten. En la naturaleza y en nuestro conocimiento de la naturaleza hay diferentes niveles de realidad y, correspondientemente, diferentes niveles de percepción: los niveles de realidad del objeto que es conocido, es decir la naturaleza (y acaso la sociedad humana), y los niveles de realidad del sujeto que conoce.

Pero la existencia de diferentes niveles de realidad no es el único factor que sustenta a la transdisciplina. Según Nicolescu hay dos factores más: la existencia de una lógica no clásica multivaluada y la complejidad misma. En el caso de la primera, para la solución de un problema se recurre a nuevas lógicas, como la conciliación temporal de los contradictorios, es decir, éstos se van a relacionar en un nivel de realidad diferente, de aquel en el cual se encuentran, no en términos de “falso” o “verdadero”, como ocurriría en la lógica binaria (Nicolescu, 1996, pp. 22-25; 1998, pp. 4-8).

Esa noción binaria clásica da sentido a dos axiomas fundamentales, el axioma de no contradicción:  $A$  no es  $\text{no-}A$  y el axioma del tercero excluido: Todo término tiene que ser  $A$  o  $\text{no-}A$ . Una tercera posibilidad queda excluída

En contraparte a la lógica tradicional, la lógica multivaluada, que surge de la mecánica cuántica y de los avances de la lógica matemática de inicios del siglo xx, incorpora nuevos axiomas o, mejor dicho, modifica a



los axiomas clásicos, particularmente el segundo, de la no contradicción. Se trata de una lógica acorde con la noción de diversos niveles de realidad y permite, como se dijo antes, la conciliación temporal de los contradictorios, la solución de problemas en un nivel distinto de realidad. Esta noción del *tercero incluido* de la lógica valuada abre la posibilidad a la conciliación, a la apertura, y a la existencia de relaciones complejas que se manifiestan de forma simultánea en el tiempo, y que pueden ser articuladas en otro nivel de realidad.

### El tercer factor: la complejidad

Al mismo tiempo de la emergencia de niveles diferentes de realidad y de nuevas lógicas en el estudio de los sistemas naturales, un tercer factor viene a añadirse para dar el golpe de gracia a la visión clásica del mundo: la complejidad” (Nicolescu, 1996, p. 27).

Horrorosa, aterradora, obscena, fascinante, invasora, la complejidad es un algo que invade gradualmente todos los ámbitos y dominios del conocimiento —refiere Nicolescu—, se nutre de los aportes de los distintos campos de la ciencia clásica, pero impulsa, a su vez, la multiplicación de nuevas disciplinas. Pero esa expansión, se remite sin remedio a la realidad multiesquizofrénica que ya hemos descrito y que ha reemplazado la realidad unidimensional simple en la cual se había estacionado el pensamiento clásico. Es necesario, entonces, una nueva visión del mundo que no tienda a la fragmentación de la naturaleza y a la parcialización de la realidad.

Se impone una *visión compleja* de la *realidad compleja*. Combatir la fragmentación de las áreas poco o nulamente relacionadas para abordar a la complejidad desde la física, la biología, las humanidades, las neurociencias o el arte, como ya se ha argumentado en el inicio mismo de este apéndice.

El mundo es una entidad total, integrada, dinámica y compleja, apunta Lara Rosano (2012), y las problemáticas que componen la realidad están entretejidas. La transdisciplina y el enfoque sistémico de la complejidad proponen entretejer las disciplinas para abordar las problemáticas que componen la realidad, y de esta forma plantear una nueva visión de la realidad. Y más allá de esa aspiración, es importante desarrollar una forma de comprender el mundo a través del pensamiento complejo. ¿Hay un camino para fomentar o desarrollar el pensamiento complejo?



Son siete principios complementarios e interdependientes los sugeridos por Edgar Morin en el capítulo 8 de *Educación en la era planetaria* (Morin, Motta y Ciurana, 2002 pp. 28-37), de acuerdo con los cuales es posible “tener la cabeza bien puesta” en esta época de fascinantes retos para la humanidad. Principios que apuntan hacia una nueva forma de pensamiento complejo, útil como *método de aprendizaje en el error y la incertidumbre*, tal cual se asienta en el subtítulo de esa obra.

### Los siete principios de Edgar Morin

- Principio sistémico u organizacional.
- Principio hologramático (todo-partes) fractal.
- Principio del círculo retroactivo (no linealidad).
- Principio del círculo recursivo (autoorganización).
- Principio de autonomía-dependencia (auto eco-organización).
- Principio dialógico (complementariedad-antagónica).
- Principio de reintroducción del sujeto cognoscente en todo conocimiento.

El primer principio permite relacionar el conocimiento de las partes con el conocimiento del todo y viceversa, lo cual permite inferir que el todo es más que la suma de las partes. Ese “más que” está integrado por fenómenos cualitativamente nuevos denominados “emergencias”. Según este principio, *la realidad es un sistema compuesto a su vez por varios sistemas*, y cada sistema se organiza a sí mismo en íntima interacción e interrelación con otros sistemas dentro de un medio ambiente social o natural.

Un sistema debe tener coherencia y límites. Está compuesto de procesos internos entre sus elementos e interacciones del sistema con el medio ambiente a través de entradas y salidas. Una familia dentro de un país, un país dentro de una cultura, una cultura dentro del conjunto de naciones, serían ejemplos de sistemas.

El segundo *principio hologramático*, construido por analogía con los hologramas fotográficos basados en luz láser, implica que cada parte contiene prácticamente toda la información del objeto representado. En toda organización compleja no sólo la parte está en el todo sino también el todo está en la parte. El ejemplo ilustrado por los autores (Morin *et al.*, 2003, p. 29 y ss.) es el siguiente: cada individuo lleva en sí la presencia de la sociedad y la sociedad está presente en cada individuo por medio del lenguaje, la cultura, sus reglamentos y normas, etc. En una célula está contenida la información genética de todo el organismo.

El *principio del círculo retroactivo* (no linealidad), alude al bucle o rizo retroactivo que rompe con la calidad lineal. Descrito inicialmente por Norbert Wiener y Arturo Rosenblueth y ampliado por Gregory Bateson, Walter Buckley y otros pensadores, el bucle retroactivo opera en otro nivel: no sólo la causa actúa sobre el efecto sino que el efecto *retroactúa* sobre la causa permitiendo la autonomía organizacional del sistema. Es la base de los procesos autoreguladores en todo tipo de sistema. La retroacción o retroalimentación negativa estabiliza al sistema, mientras que la positiva es la ruptura de la regulación del sistema y la ampliación de una determinada tendencia o desviación hacia una nueva situación incierta.

Un sistema es afectado y a su vez afecta al medio en que está inscrito. Una familia, por ejemplo, es afectada por el sitio geográfico en que vive, la cultura y la geografía, pero a su vez influye en la cultura y el lugar geográfico donde vive.

El cuarto principio está relacionado con la autoorganización, se trata del *círculo recursivo o de la recursividad* y va más allá de la retroactividad. Los productos de un proceso recursivo son necesarios para la propia producción del proceso. Es una dinámica autoproductiva y auto organizacional que da lugar a la autopoiesis. Es un círculo generador donde los productos y los efectos son al mismo tiempo causas y productores de aquello que los produce: los estados finales son necesarios para la generación de los estados iniciales; se producen y reproducen a sí mismos. Un sistema vivo es capaz de transformarse a sí mismo para adaptarse al entorno cambiante, lo que usualmente se llama autoorganización.

La autonomía-dependencia es el quinto principio mediante el cual se introduce la idea de proceso auto-eco-organizacional. La dependencia para obtener autonomía. Toda organización para mantener su autonomía necesita de la apertura del ecosistema del cual se nutre y al que transforma. No hay autonomía sin dependencias múltiples. La autonomía de un individuo, por ejemplo, depende de la energía que capta del ecosistema y de la información cultural.

Mediante el *principio sexto, el dialógico*, es posible asociar dos términos a la vez complementarios y antagónicos en una realidad (recuérdese el axioma del tercero implicado en la lógica multivaluada). Puede ser definido, señala Morin, como la asociación compleja (complementaria-concurrente-antagonista) de instancias necesarias, conjuntamente necesarias para la existencia, el funcionamiento y el desarrollo de un fenómeno organizado. Incluye la inseparabilidad racional de nociones contradictorias para acceder a un fenómeno complejo. Ejemplo de lo anterior es la imposibilidad de pensar en la sociedad reduciéndola a los individuos o a la totalidad social.

Por último, el principio de *reintroducción del sujeto cognoscente en todo conocimiento*, permite recuperar el papel activo del sujeto, que había sido excluido por un objetivismo epistemológico ciego. Es preciso reintroducir el papel del sujeto observador, estrategia de todo conocimiento. El sujeto no refleja la realidad. El sujeto reconstruye la realidad por medio de los principios antes mencionados.

El método se vuelve central, explican los autores (Morin *et al*, p. 32), cuando necesaria y activamente se reconoce la presencia de un sujeto que busca, conoce y piensa. Cuando se sabe que el conocimiento no es la acumulación de datos o de información, sino la organización coherente de esa información.

Tales son, en una exposición muy sintética, los tres pilares de la metodología de la investigación transdisciplinaria que propone Nicolescu en su *Manifiesto: los niveles de realidad, la lógica del tercero incluido y la complejidad*, más los principios que guían la construcción de un pensamiento complejo, no lineal, según Morin. Son propuestas que, como se verá más adelante, se derivan y encuentran eco en numerosos autores que se han dado a la tarea de establecer los grados de transdisciplina a los que aspira la investigación contemporánea.

## La transdisciplina y el pensamiento complejo en la investigación de la realidad

De acuerdo con los esquemas anteriores y la apretada síntesis ofrecida, la investigación de la realidad debe ser un ejercicio transdisciplinario cuyo eje principal estará regido por el enfoque de ciencias de la complejidad o de los sistemas complejos. Para facilitar esta tarea, se hará en este apéndice una revisión de aquellos ejes teóricos que dan sustento a esa disciplina emergente como son la teoría general de sistemas, los sistemas no lineales, los sistemas adaptativos, la teoría de redes complejas, la teoría del caos, los sistemas fractales y la cibernética del segundo orden o sociocibernética.

De esos ejes teóricos se destacan aquellos principios que permiten desarrollar un lenguaje común, un reservorio de conceptos y definiciones útiles para encontrar la articulación necesaria entre campos divergentes de investigación, y por congruencia con los postulados del *Microanálisis Sintético* como la metodología científica pertinente.

- Análisis y evaluación de las teorías más pertinentes para explicar la dinámica y estructura de la problemática.

En los capítulos se destacarán los aportes de enfoques teóricos desarrollados en el ámbito de las ciencias sociales, que serán de gran utilidad para lograr la articulación referida. Se trata de enfoques críticos de la teoría social que ha señalado Buckley (1967, 1968) y Wallerstein (2001) como útiles para el análisis social y que están basados en la interacción de los elementos de un sistema, la autoorganización y la emergencia social.

De entre ellos destaca el *interaccionismo simbólico* desarrollado originalmente por la llamada Escuela de Chicago en los inicios del siglo XIX, detectable en la obra de George Herbert Mead, y actualizado por Herbert Blumer y Norman Denzin. Por otro lado, se hará la revisión de los postulados de sociólogos clásicos como Max Weber y contemporáneos, como Anthony Giddens. El primero para centrar el análisis de lo social en la necesaria perspectiva hermenéutica (actualizada por el ya mencionado Denzin) y el segundo será de gran utilidad para discutir la tradicional oposición agencia-estructura que ha signado a la investigación social académica prácticamente desde sus orígenes.

Todos estos postulados serán confrontados y rearticulados en un modelo de análisis que incluirá el aporte del *corpus* científico de la ciencia de la comunicación y de la teoría neurocognitiva, necesarios para centrar el estudio y explicación de *internet* y la *web* como fenómenos comunicativos emergentes, describibles y analizables desde un punto de vista sistémico-complejo. Fenómenos que, a su vez, encuentran un símil, o un modelo equivalente con los procesos neurocognitivos.

En este punto es conveniente reelaborar el “mapa” conceptual, mediante el cual se declara la vía epistémica por la que toma curso esta investigación y que implica adoptar a las llamadas ciencias de la complejidad como paradigma teórico, el cual incorpora de manera armónica el enfoque de los Sistemas Complejos, que en palabras de Prigogine (1996, p. 134), revolucionó la física, la química y la biología; la Teoría de Redes Complejas y el análisis de redes sociales, enfoque que “impregna a toda la ciencia, de la neurobiología a la física estadística” (Strogatz, 2001, p. 57) y que, al igual que el paradigma de los Sistemas Complejos, permiten descubrir afinidades sorprendentes en campos aparentemente distantes entre sí.

## Sobre los orígenes de la Teoría de los Sistemas Complejos

La noción de sistema no es reciente y ha estado latente en el pensamiento filosófico y científico desde, por lo menos, los tiempos homéricos. Como pasa con toda nueva idea, refiere Bertalanffy en el prólogo de su *Teoría*

*General de los Sistemas* (1960), el concepto tiene una larga data. Sin embargo, el concepto como tal no fue ni bien acogido ni bien comprendido durante milenios, aunque incluye muchos nombres ilustres.

Como filosofía natural, Bertalanffy encuentra el concepto en Leibniz, Paracelso, Vico e Ibn-Kaldun. Como sucesión de entidades o sistemas culturales, puede remontarse a Marx y Hegel por mencionar a sólo un par de una amplia panoplia de pensadores. Pero en el ámbito literario y artístico (esos rebeldes visionarios), pueden rastrearse en Nicolás de Cusa, Goethe y Herman Hesse, entre otros. Llama la atención, por supuesto, que las indagaciones de von Bertalanffy no se hayan alejado mucho de la cultura germana.

La palabra *sistema* tiene sus raíces en el griego *συστημα* que significa conjuntar, combinar, organizar. Acaso influido por sus experiencias directas dentro de la política pura y dura en Sirac, en su diálogo *Las Leyes* (*Νομοι*), Platón (427-347 a. C.) aborda problemas sobre la política y la organización social de una forma realista y menos idealista que en su juventud.

En ese *Diálogo*, en el cual participan un anciano ateniense (tal vez el propio Platón), Megilio y Clinias en su viaje de la ciudad de Cnosos al templo de Júpiter, es posible detectar la noción de *interrelación* e *interdependencia* asociado con la idea de fuerza *conjunta*, cuando se habla de la relación entre filosofía, religión y política (Platón, *Las Leyes*, TI, libro IV):

...las mejores leyes no son las que tienen por objeto desenvolver en el Estado una sola parte de la virtud, como el valor, sino las que son propias para despertar en el alma de los ciudadanos, y por consiguiente en el Estado, todas las virtudes a la vez, o por mejor decir, la virtud.

Y en Filebo (*φιληβοζ*), el diálogo dedicado al rol del placer y la inteligencia en la vida, Platón, a través de Aristóteles desarrolla la idea de composición e interrelación cuando, al argumentar acerca de las conveniencias de una vida mixta (el placer más la inteligencia), habla de cuatro clases de composición: lo ilimitado, el límite, la mezcla de ambos y la causa de la mezcla.

Pero un antecedente más específico de la Teoría de los Sistemas se puede encontrar en los trabajos de Immanuel Kant (1724-1804), en su *Crítica de la razón pura* (*Kritik der reinen Vernunft*, 1781), donde explícitamente llama sistema a la unión de formas diversas del conocimiento bajo una sola idea. De igual manera en la *Crítica de la facultad de juzgar* (*Kritik der Urteilskraft* 1790), cuando se enfrenta a la mecánica de lo orgánico, define un organismo como una unidad estructural y funcional

cuyas partes no sólo existen una para la otra, sino cada una debe su existencia a la otra. Es un sistema:

Un producto organizado de la naturaleza es aquél en que todo es fin, y, recíprocamente, también medio. Nada en él es en balde, carente de fin, o imputable a un ciego mecanismo natural” (1790: 307).

Sorprendentemente, al argumentar sobre los principios causales y los teleológicos referidos a la vida natural, Kant anticipa una noción central de la Teoría de los Sistemas actual. Así, cuando habla del “fin natural”, señala que una cosa lo es, no solamente un ser organizado, sino un ser auto organizado, es decir, un ser que se organiza a sí mismo (“*sich selbst organisierendes Wesen*”): “...una cosa es un fin natural cuando es a la vez [...] causa y efecto de ella misma” (1790, p. 235).

Casi contemporáneo de Kant, e influido por él, Johann Wolfgang von Goethe (1749-1832), el prolífico dramaturgo, ilustrador y novelista, encontró tiempo para ocuparse de asuntos relacionados con la ciencia natural en materia de taxonomía, teoría del color y observación de la vida silvestre, y aportó ideas concretas sobre el asunto de los sistemas, pues veía al ser como una totalidad orgánica, y llegó a afirmar que la forma es un patrón de relaciones en el seno de un todo organizado, “la naturaleza es un todo armonioso”, como animado por la presencia divina. En la *natura creatrix*, afirma, opera una potencia ordenadora, tanto en lo más pequeño como en lo más grande organizado en escalones que no son inmutables” (Eckerman, 2005, pp. 56-74).

Con un sesgo científico más definido es posible encontrar antecedentes fundamentales de la Teoría de los Sistemas en la obra de Jules Henri Poincaré (1854-1912), quien introduce la noción de caos y de bifurcación en sistemas dinámicos en dos de sus trabajos: *Les methodes nouvelles de la mécanique celeste* (1892) y *Science et methode* (1903).

Del primer trabajo suele destacarse su intuición de la posibilidad de caos en un sistema determinista al discurrir sobre las órbitas planetarias, trabajo que suscitó poco interés hasta que comenzó el estudio moderno de la dinámica caótica alrededor de 1963 (Wikipedia, 20 de marzo de 2012). A partir de ciertos modelos matemáticos, Poincaré intuyó que el efecto multiplicativo del error (que se encuentra en la base misma de la teoría del caos), no es debido a la ignorancia o el limitado conocimiento del observador acerca de lo real, sino que obedece a la misma configuración de la realidad (Mainzer, 2007, p. 17).

Por otra parte, mediante la teoría cualitativa de ecuaciones diferenciales, Poincaré propuso hacer la descripción geométrico-topológica del

estado de fase de un sistema, es decir, soluciones (cálculos) que trazan o describen todas las trayectorias que dentro de un espacio dado recorre un sistema al moverse en el tiempo. Se trata del modelado matemático-geométrico de fenómenos que de ninguna manera pueden considerarse como simples o lineales. Enfoque cualitativo que, señala Mainzer, abrió la noción de estabilidad estructural y de bifurcación.

También francés, un médico y científico usualmente poco reconocido, incluso cuando fue uno de los fundadores de la medicina experimental y creador de diversas técnicas quirúrgicas, Claude Bernard (1812-1878), popularizó el concepto de *homeostasia* (constancia del medio interior) alrededor de 1860, si bien el término fue acuñado años después por W. B. Cannon. Definía a ese fenómeno como la cualidad definitoria de los seres vivos basada en la capacidad para mantener las condiciones físico-químicas del medio con el cual están en contacto. Una noción de equilibrio “vivo”, que más tarde vendría a ser revalorado.

Wolfgang Köhler (1887-1967), el etólogo y psicólogo cofundador de la psicología de la Gestalt, realizó otro aporte a la teoría en 1927 (*Zum Problem der Regulation*), al plantear el postulado de una teoría de sistemas encaminada a elaborar las propiedades más generales de los sistemas inorgánicos en comparación con los orgánicos; ideas de las cuales eventualmente surgió la idea de los sistemas abiertos, concepto éste intuitivo y trabajado en el ámbito de las poblaciones humanas por Alfred James Lotka (1880-1949), quien en *Elements of Mathematical Biology* (1925), desde un punto de vista estadístico visualiza a las poblaciones integradas por múltiples individuos en una analogía muy próxima a las células en un organismo. Se extiende así, la noción de sistema por primera vez a lo social.

Estrechamente vinculado con el trabajo de Lotka, conviene señalar, así sea de paso, al matemático italiano Vito Volterra (1860-1940), quien desarrolló la solución a las ecuaciones integrales de límites variables aplicable al crecimiento de poblaciones de peces. Sus trabajos, vinculados a los de Lotka (*depredador-presa*, modelo matemático Lotka-Volterra), resultaron de gran utilidad en el modelado computacional y para hacer tangibles los conceptos abstractos de *interdependencia* y *acoplamiento*, características *isomorfas* (búsqueda de estructuras similares en fenómenos distintos) de todos los sistemas.

En la década de los años veinte del siglo pasado, hay una eclosión notable de filósofos, científicos y artistas que suelen vincularse con la Teoría de los Sistemas. En 1925, año de la publicación del trabajo de Lotka aparece también, de Alfred North Whitehead (1861-1947), *Science and the Modern World*, ampliación de un trabajo anterior (*The Concept of Nature*, 1920) que introduce la filosofía del mecanicismo orgánico.



Dentro de ella, suele destacarse su noción de proceso, donde las sustancias no preexisten como cabría esperar de un animismo, sino que han de ser contempladas como consolidaciones de las pautas recurrentes que siguen los procesos. Éstos, los procesos, acaban por consolidarse en entidades y seres momentáneos e históricos. Los sujetos, los seres, tienen una historia inscrita en el entorno del cual extraen sus elementos constitutivos. Todo esto en un *continuum* que no cesa prosigue lo anterior y antecede lo por venir.

## Cannon y la homeostasis

Walter Bradford Cannon (1871-1945), entre sus múltiples actividades (entre las que destaca la de haber sido un alpinista notable) dio continuidad al concepto de equilibrio orgánico que desarrollara el francés Bernard al cual bautizó como *homeostasia* u *homeostasis*. En *The Wisdom of the Body*, publicado por primera vez en 1932, ofrecía una detallada descripción de esta interacción entre los organismos y el entorno, descripción que, junto con el científico mexicano Arturo Rosenblueth (corresponsable también del desarrollo de la cibernética), concentró en cuatro proposiciones:

- La constancia en un sistema abierto, tal y como se presenta en los cuerpos humanos, requiere de un mecanismo que actúe para mantener dicha constancia. Para hacer esta proposición, Cannon se basó en la observación de las formas en que ocurría la estabilización, la concentración de la glucosa y la temperatura corporal se mantenían equilibrados y regulados en los organismos humanos.
- Unas condiciones de estado “estables”, requieren que toda tendencia al cambio automáticamente obtenga una respuesta de resistencia a ese cambio. Por ejemplo, un aumento en la concentración de azúcar en la sangre desencadena una sensación de sed, en un intento del organismo por diluir la concentración de azúcar.
- El sistema de regulación que determina el estado homeostático se compone de una serie de mecanismos cooperantes que actúan simultánea o sucesivamente. La azúcar en la sangre está regulada por la insulina y el glucagón (sintetizadas y secretadas por el páncreas), y otras hormonas que controlan su liberación desde el hígado y su absorción en los tejidos.
- La homeostasis no ocurre por accidente. Es el resultado de una autoorganización o una suerte de autogobierno.



## Von Bertalanffy y la Teoría General de Sistemas

Y es precisamente en 1932, cuando refiere Bertalanffy que inició sus trabajos sobre una teoría general:

A principios de la tercera década del siglo XX, quien esto escribe se sentía desconcertado ante vacíos evidentes en la investigación y la teoría biológica. El enfoque mecanicista entonces imperante [...] parecía desdeñar, si no es que negar activamente, lo que es, ni más ni menos, esencial en los fenómenos de la vida (Bertalanffy, 1945, p. 7).

Pero no fue sino hasta después de la Segunda Guerra Mundial cuando resurge el pensamiento sistémico con la expedición de la Teoría General de Sistemas (TSG) en 1945, como un intento histórico de lograr una meta teoría o filosofía científica, capaz de abordar diferentes niveles de la realidad. Un esfuerzo de búsqueda de conceptos y leyes válidos para la descripción e interpretación de toda clase de sistemas reales o físicos. Y tal búsqueda implica la elaboración e identificación de herramientas útiles para otras disciplinas o ramas de la ciencia en su investigación práctica.

Se trata, afirma Bertalanffy (1945, pp. 45-67), de buscar isomorfismos en distintos niveles de la realidad que permitan formalizar las descripciones de la realidad, a partir de la cual puedan modelarse las interpretaciones que se hacen de ella. La TSG intenta, además, facilitar el desarrollo teórico en campos en los cuales es difícil la abstracción del objeto, sea por su complejidad o por su historicidad, es decir, su carácter único. Los sistemas son históricos, y al estar dotados de memoria, sólo pueden ser comprendidos si se conoce su trayectoria en el tiempo. Por último, esta teoría se propone superar la oposición entre dos formas de aproximación a la realidad: la analítica (reducción), y la sistémica (composición).

En la búsqueda por descubrir regularidades abstractas comunes a sistemas reales complejos pertenecientes a distintas disciplinas la TSG representó, desde su enunciación, un intento de superación de disputas clásicas en el terreno de la filosofía y la epistemología en torno de la realidad y el conocimiento: el materialismo frente al monismo, el reduccionismo frente al holismo y el causalismo frente a la teleología. Disputas que, como se verá adelante, periódicamente resurgen y se reexaminan a la luz de problemas inherentes a campos donde la TSG recién se incorpora.

“No fue fácil lograr una definición sencilla de la cibernética” —decía Arturo Rosenblueth en 1955—. “Y es que su estudio implica el análisis e integración de numerosos conceptos que provienen de diversas disciplinas científicas: la neurología, las matemáticas y la tecnología.”

## La cibernética de Norbert Wiener y Arturo Rosenblueth

Una adición importante a la TSG enunciada por Von Bertalanffy es la Teoría de la Cibernética expedida por Norbert Wiener y Arturo Rosenblueth Stearns en 1942. El postulado original se plantea en el libro *Cybernetics* como una teoría matemática de la comunicación y el control de sistemas mediante la regulación de la retroalimentación. Para ello, Wiener (1961) se declara deudor del aporte de otros pensadores como Claude Shannon (Teoría de la Información que se verá con detalle en otro capítulo) y con los aportes de otras disciplinas.

Una de las fuentes importantes para el génesis de la cibernética, por ejemplo, fueron las conferencias organizadas por la Fundación Macy entre 1940 y 1950 sobre temas como “calidad circular y procesos de retroalimentación en sistemas sociales y biológicos”. Las memorias de dichas conferencias pasaron por las manos de Heinz von Foerster, quien más adelante propuso, en una vuelta de tuerca, *la cibernética de la cibernética*.

La Cibernética (del griego piloto o timonel, *kubernites*, *Κυβερνητής*), afirma Wiener, tiene por objeto el control y comunicación en el animal y en la máquina; lo que implica desarrollar “un lenguaje y técnicas que nos permitan abordar el problema del control y la comunicación en general”. Autores hay que la caracterizan de una manera más directa, dado su aporte más importante: la teoría de la autorregulación y autocontrol de los sistemas por realimentación.

Repito que la retroalimentación es un método para regular sistemas introduciendo en ellos los resultados de su actividad anterior. Si se utilizan estos resultados como simples datos numéricos para corregir el sistema y regularlo, tenemos la sencilla retroalimentación de la ingeniería que se ha dado en llamar de control. Sin embargo, si la información que procede de los mismo actos de la máquina puede cambiar los métodos generales y la forma de actividad, tenemos un fenómeno que puede llamarse de aprendizaje” (Wiener, 1949, p. 56).

Tiene pues, dentro de la teoría, un papel central la retroalimentación o realimentación (*feedback*), como un mecanismo o proceso circular de control presente en todos los sistemas dinámicos, mediante el cual una cierta proporción de la señal de salida del sistema se redirige a la entrada como información; de esta forma el sistema se autorregula para mantener un equilibrio u orientarse hacia una meta. La realimentación, al ser positiva (proceso morfo genético), impulsa al sistema hacia el desequili-

brio, la innovación y el cambio, mientras que al ser negativa (proceso morfo estático), inhibe y estabiliza al sistema.

## Seis aspectos de la Cibernética

En resumen, destacan seis aspectos de la cibernética, expuestos algunos por Wiener y Rosenblueth, y ampliados por otros pensadores en años posteriores:

- Aspecto sistémico. Para abordar de forma integral las interacciones y la complejidad del problema.
- Aspecto dinámico. Interesa el comportamiento de los objetos más que su composición o materialidad.
- Aspecto interactivo. Motor de acciones recíprocas entre elementos o integrantes del sistema, y la atención al orden que se da entre ellas.
- Aspecto autoreferencial. Compuesta por diversas formas de circularidad o niveles de retroalimentación, siempre referida a las interacciones sistémicas.
- Aspecto informativo. La información está sujeta a selecciones y contingencias que dependen, a su vez, de la organización del sistema.
- Aspecto regulativo. Que mantiene el nivel de operación del sistema respecto de las perturbaciones del entorno.

Un paso hacia la consolidación de la Teoría de los Sistemas Complejos en el ámbito de las ciencias sociales puede atribuirse a Talcott Parsons (1902-1979), quien se empeñó en aplicar el concepto de sistema de von Bertalanffy al análisis social y desencadenó una corriente de pensamiento que se dio en llamar estructural-funcionalismo (nominación con la cual él nunca estuvo de acuerdo).

En su obra *El sistema social* (1951), a partir de ideas tomadas de la cibernética (el equilibrio), de Durkheim (en lo referente al funcionalismo, pero en un sentido no organicista), de Weber (la acción social), y de Bertalanffy (sistema, jerarquía e interrelación), sostiene que las sociedades tienden hacia la autorregulación, así como a la interconexión de sus elementos estructurales como los valores, las metas y las funciones. Al dar un valor prominente a la preservación del orden social (el equilibrio), recibió duras críticas por su visión conservadora y prácticamente inamovible de los sistemas humanos.

## Los Subsistemas funcionales de Parsons (AGIL)

Destaca su intento de explicar a la sociedad humana con base en cuatro grandes subsistemas que explicaba sintéticamente mediante el acrónimo AGIL:

- A: Adaptación al entorno (*adaptation*).
- G: Capacidad de alcanzar metas (*goal attainment*).
- I: Integración entre los imperativos funcionales (*integration*).
- L: Latencia. Renovación de factores de motivación de los individuos y las pautas culturales que crean y mantienen la motivación (*latency pattern maintenance*).

El mantenimiento del sistema general, depende, según Parsons, de la coordinación entre esos subsistemas.

## La Ingeniería de Sistemas de Hall

Diez años después, Arthur David Hall III (1925-2006), ingeniero estadounidense, se convirtió el pionero en el campo de la ingeniería de sistemas gracias a su reconocido libro de texto *A Methodology for Systems Engineering* (1962), en el cual propone una metodología de trabajo con sistemas en el ámbito de la ingeniería, las telecomunicaciones y la planeación práctica:

Desafortunadamente, la palabra sistema tiene muchos significados coloquiales, algunos de ellos sin lugar en la discusión científica. Para excluir algunos de esos significados, y al mismo tiempo proveer un punto de arranque sólido ofreceremos la siguiente definición: un sistema es un grupo de objetos en proximidad con relaciones entre ellos y sus atributos (Hall, 1956, p. 84).

A estas ideas, muy focalizadas en los sistemas “duros” de la ingeniería o de entidades físicas (sistemas hay cuya proximidad física es nula o muy difícil de establecer, como se verá adelante, en esta investigación), las acompañó con puntos concretos para la realización de trabajos de investigación o diseño:

- Definición del problema (*problem definition*).
- Selección de objetivos (*choosing objectives*).

- Síntesis de sistemas (*systems synthesis*).
- Análisis de sistemas (*systems analysis*).
- Selección del sistema (*systems selection*).
- Desarrollo del sistema (*systems development*).
- Ingeniería (*current engineering*).

Destaca en esta ingeniería de sistemas, el papel del hombre como una criatura que resuelve problemas (*God Made Homo Sapiens a Problem-Solving Creature* [Hall, 1989, p. 132]). Es decir una parte activa del propio sistema. Idea que retomaron pensadores posteriores. En sistemas humanos, el que estudia o diseña también es parte del sistema.

## Von Foerster y la Cibernética de Segundo Orden

Para incluir dentro del sistema al observador, diseñador o modificador del propio sistema, es preciso ampliar el concepto, tarea que asumieron pensadores como Gregory Bateson (1904-1980), Heinz von Foerster (1911-2002), Margaret Mead (1901-1978) y Ernst von Glasersfeld (1917-2010), con la llamada Cibernética del Segundo Orden, dentro de la cual el hombre es un sistema cibernético de alto nivel que puede comprender y controlar a sistemas cibernéticos de nivel inferior.

Estas ideas, que se gestaron entre las décadas 1970 y 1990 del siglo pasado, han tenido serios impactos en el desarrollo de la Teoría de los Sistemas Complejos y otras áreas. De hecho, se dice que las reflexiones sobre los sistemas complejos pueden llegar a un orden holístico-filosófico. Incluir al sujeto observador dentro de lo observado y desviar la atención de las observaciones a los usuarios de las observaciones transformó a la cibernética en una epistemología: una disciplina centrada no sólo en la estructura de la realidad, sino sobre el conocimiento de esa realidad. Epistemología que se aproxima mucho a la epistemología genética de Piaget, e incluso a la mecánica cuántica, como se desprende de la siguiente cita de Humberto Maturana, creador del concepto de *autopoiesis* (1928): “el observador se hace en la observación y cuando el ser humano que es el observador muere, el observador y la observación llegan a su fin” (1998, p. 158).

A partir de 1980 la cascada de trabajos relacionados con los sistemas complejos es impresionante. Cabe mencionar el esfuerzo de Luhmann sobre la teoría de la comunicación y los sistemas sociales autopoiéticos (1984). Trabajos que suelen estar vinculados a una rama del estudio de la

complejidad: la sociocibernética liderada principalmente por Foerster (1984) y Glasersfeld (1991).

## Los Sistemas Suaves y Checkland

También, a caballo entre las décadas de 1980 y 1990, tienen lugar varios aportes que permiten ampliar aún más el concepto de sistemas complejos e incluir a la política, la cultura y otros subsistemas integrados por las reglas sociales, mediante la Metodología de los Sistemas Suaves (*Soft System Methodology*, ssm), representada por Peter Checkland (1930-), e integrada por un conjunto de etapas bien organizadas para enfrentar y solucionar problemas o situaciones problemáticas en sistemas humanos. Problemas que involucren dilemas psicológicos, societarios o culturales.

La ssm propone considerar las diferentes percepciones de una situación problemática para definir un proceso sistémico de aprendizaje, en el cual todos los puntos de vista son discutidos y examinados para definir acciones orientadas a la solución más pertinente. Originalmente desarrollada en la Universidad de Lancaster, Inglaterra, alrededor de 1966 por un grupo de académicos, la ssm obtuvo su mayor difusión a partir de un trabajo publicado por Checkland: *Systems Thinking, Systems Practice* (1981), al cual le han seguido numerosas publicaciones que actualizan y ejemplifican su utilización en los contextos más diversos. En su forma original, la ssm implica siete etapas de trabajo:

- Enterarse de la situación del problema.
- Expresar la situación del problema.
- Formular las definiciones básicas de los sistemas relevantes.
- Construir modelos conceptuales de los modelos de la actividad humana.
- Comparar los modelos con el mundo real.
- Definir los cambios que son deseables y factibles.
- Tomar medidas para mejorar la situación real.

El aspecto dinámico de la metodología, enfatiza Checkland (1981:, p. 149), se manifiesta en las etapas dos a la cuatro, que demandan un proceso interactivo de debate guiado entre los involucrados (identificados como *stake-holders*, interesados o afectados), en el cual deben surgir varias definiciones básicas y modelos conceptuales, hasta lograr un modelo por consenso, que será la base de la solución o los cambios requeridos para solucionar un problema.

Actualmente, señala Lara Rosano, el paradigma de los Sistemas Complejos no cesa de evolucionar hacia la unidad de la ciencia, e incorpora de manera armónica y funcional los aportes de la teoría del caos de la cual fue pionero Edward Norton Lorenz (1917-2008), de los fractales, propuesta por Benoît Mandelbrot (1924-2010), las estructuras disipativas explicadas por Ilya Prigogine (1917-2003), y las propuestas que consideran a todo lo humano como sistemas de significado y aprendizaje, donde no quedan excluidos las ideas, los valores, los conceptos y aún los “problemas retorcidos” desarrolladas por C. West Churchman (1913-2004) y Russel L. Ackoff (1919-2009), entre otros.

## La fractalidad de Mandelbrot

Mención especial merece la geometría fractal del matemático polaco Benoît Mandelbrot expedida en 1975 a partir de observaciones y descripciones hechas por lo menos un siglo antes, como es el caso de la función de Weierstrass (1872), o el copo de nieve de Helge von Koch (1904), o la alfombra y el triángulo de Waclaw Sierpinski (1915), los conjuntos de Pierre Fatou y Gaston Julia (1922), entre muchos otros matemáticos y geómetras. Es Mandelbrot, sin embargo, el primero que propone a la geometría fractal (del latín *fractus*, quebrado o fracturado) como un principio unificador de todos esos aportes (algunos de los cuales fueron abiertamente desdeñados en su tiempo), y como una vía para describir y comprender fenómenos presentes en la naturaleza y aún en la cultura:

la geometría fractal no distingue, a propósito, entre conjuntos matemáticos (la teoría) y objetos naturales (la realidad). Es incomparablemente más afín al mundo físico que la geometría euclidiana (Mandelbrot, 1993, p. 35).

De acuerdo con ello, un objeto es autosimilar o autosemejante si sus partes tienen la misma forma o estructura que el todo, aunque pueden presentarse a diferente escala y estar ligeramente deformadas. A partir de esta definición se tiene que un objeto geométrico fractal tiene las propiedades de ser demasiado irregular para ser descrito por la geometría euclidiana o tradicional. Es autosimilar porque su forma está hecha por copias más pequeñas de la misma figura y se puede definir mediante un algoritmo recursivo.

Cuando se habla de un conjunto de Mandelbrot (Wikipedia, 27 de abril de 2012), se dice que es un fractal autosimilar generado por el conjunto de puntos estables de órbita acotada bajo cierta transformación ite-

rativa no lineal y de ellos abundan ejemplos en la naturaleza. Las nubes, las montañas, el sistema circulatorio de un ser vivo, las líneas costeras, los copos de nieve, la forma en que se estructuran las moléculas en los cristales, etcétera.

Se han identificado por lo menos tres grados de autosimilitud: la exacta, cuando el fractal parece idéntico en diferentes escalas, típica en fractales de funciones iteradas, como serían el triángulo y la alfombra de Sierpinski, el copo de nieve de Koch o la esponja de Menger (véase la figura 2).

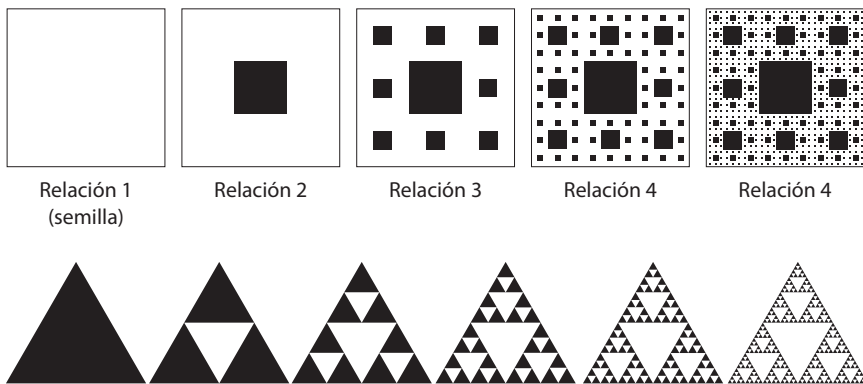


FIGURA 1. Fractales con autosimilitud exacta. Triángulo y tapete de Sierpinski.  
La identidad se mantiene en distintas escalas

Los fractales con cuasiautosimilitud contienen copias de sí mismos, menores y distorcionadas. Aquellos fractales identificados o generados por relaciones de recurrencia son típicos de la cuasiautosimilitud, como el fractal de Julia, el de Lyapunov, o el conjunto de Mandelbrot (véase la figura 3).

Por último, los fractales con autosimilitud estadística, son los más débiles y se identifican siempre que el fractal tenga medidas numéricas o estadísticas conservadas durante el cambio de escala. Los fractales aleatorios generados por procesos estocásticos no deterministas, como el movimiento browniano, el vuelo de Lévy o los árboles brownianos construidos a partir de una agregación por difusión limitada, son típicos ejemplos.

La utilidad práctica de esta geometría es vasta y no se limita al ámbito artístico o el mero ocio matemático (como llegó a opinar de los fractales Poincaré). Se ha utilizado para la compresión de imágenes en la ciencia



computacional (la reconstrucción de las imágenes “comprimidas”), para identificar el modelado de las formas naturales (junto con las simetrías y las espirales se encuentran en la información genética y los procesos de desarrollo natural) y, como se verá a continuación, para la identificación y tipificación de la dinámica evolutiva de los sistemas complejos.

## Fractales y sistemas

Al representar gráficamente el comportamiento de un sistema complejo que se mueve al borde del caos se revela siempre una estructura fractal que al crecer o evolucionar revela una característica más: la autosimilitud. Esto es, las partes que componen al sistema tienen la misma forma del todo pero en diferentes escalas. Es la misma fractalidad recurrente en la naturaleza: un árbol es un ejemplo sencillo de esta similitud de la parte con el todo. Las nervaduras en las hojas y las pequeñas ramas más alejadas del tronco guardan una similitud en simetría con las ramas más próximas al tronco. No es necesario que la similitud sea exacta para aceptar un patrón como fractal.

Las formas fractales no sólo se presentan en las morfologías espaciales de los objetos, la materia biológica y otros fenómenos del universo, sino que se observan en las dinámicas de los sistemas adaptativos complejos, en las cuales se parte de una realidad establecida simple y se acaba en la creación de una nueva realidad más compleja; que a su vez forman parte de ciclos más complejos, que a su vez forman parte del desarrollo de la dinámica de otro gran ciclo, que a su vez... Y en las evoluciones dinámicas de esos ciclos son recurrentes las similitudes fractales entre todos esos subsistemas, sistemas y suprasistemas (más adelante veremos con detalle el principio de heterarquía fractal).

Es cada vez más generalizada la idea de que la fractalidad emerge no sólo en la naturaleza, sino que también es detectable en las configuraciones sistémicas de la sociedad humana. Un ejemplo muy recurrente la anticipación intuitiva que tuvo Karl Marx cuando estudió aquellos rasgos sumarios y esenciales que engendran al sistema capitalista. Una de ellos, la propiedad privada de los medios de producción, permitió a Marx afirmar que esa forma legal de vinculación social se desarrollaría históricamente hacia el monopolio, aquello que hoy llamamos las corporaciones.

## La teoría del caos

Con ese nombre popular se conoce a la rama de la física, las matemáticas y otros campos del conocimiento que enfrentan ciertos fenómenos dinámicos muy sensibles a las variaciones en las condiciones iniciales que, en palabras de Edward Lorenz (1917):

Implica que dos estados con diferencias imperceptibles pueden acabar evolucionando hacia dos estados considerablemente diferentes. Entonces, si hay cualquier error al observar el estado presente —y en cualquier sistema real tales errores parecen inevitables—, una predicción aceptable de un estado instantáneo en el futuro lejano podría muy bien ser imposible (citado en Sardar, 2006, p. 43).

Lorenz fue el primero en descubrir y describir el comportamiento caótico de un sistema que se creía bien conocido: el climático. Tras estudiar la interacción no lineal entre la temperatura, la presión y la velocidad del viento, y darles un tratamiento de modelado por computadora, descubrió el principio fundamental citado, que contradecía una idea del pensamiento lineal tradicional: los cambios pequeños sólo tenían consecuencias pequeñas. Por el contrario, los resultados obtenidos por Lorenz, una y otra vez, indicaban que cambios diminutos en las condiciones iniciales tenían consecuencias muy variadas e impredecibles. Consignó su descubrimiento en un artículo intitulado “Deterministic Nonperiodic Flow” en el *Journal of the Atmospheric Sciences*, en 1961, y no fue sino diez años después cuando se comenzó a relacionar con la geometría de fractales, el estudio de las turbulencias en fluidos y la Teoría General de Sistemas, que su aporte empozó a valorizarse.

Dentro de la descripción matemática del comportamiento de sistemas dinámicos en el tiempo, hay una característica denominada *atractor*, que representa aquellos estados en los cuales se estabiliza el sistema de acuerdo con sus propiedades. La representación de esos atractores se realiza en gráficos o planos multidimensionales conocidos como *espacio de fase o de estado* (ver ejemplo en la figura 2), que permiten graficar o representar un objeto en un momento determinado de su evolución. Ahora bien, la descripción de ciertos comportamientos de sistemas dinámicos complejos, es decir, que denotan comportamientos o atractores fuera de lo normal, suelen denominarse como *atractores extraños* o caóticos, pues tienen las siguientes propiedades:

- Son peculiares en su representación multidimensional, “extraños” o “raros”.
- Su movimiento tiene una dependencia muy sensible a las condiciones iniciales.
- Reconcilian efectos contradictorios: las trayectorias próximas convergen hacia ellos y, al ser sensibles a las variaciones iniciales, las trayectorias inicialmente próximas rápidamente divergen.
- Trasladan el patrón de flujo de energía, con lo que alteran eventualmente la operación de todo el sistema.
- Sólo tienen una dimensión finita, aún cuando se “muevan” en un espacio o dimensión infinito.

Los bucles, giros y cambios de trayectoria en esos atractores extraños, señala Sardar (2006, p. 50) corresponden a la periodicidad, las torsiones, al cambio, el espacio vacío, e incluso a la imposibilidad física de manobra del sistema descrito.

La construcción de esta teoría debe mucho a muchas otras personalidades como David Ruelle y Floris Takens con su estudio de las turbulencias (1971), Robert May (1936-) con su estudio de la fluctuación de las poblaciones animales (1974), Mitchell Feigenbaum y su demostración matemática de la universalidad caótica (1981) y, sobre todo, al químico belga Ilya Prigogine (1984). De éste último es a tal grado importante su aporte que merece mención aparte.

### Prigogine, disipación, autoorganización e inestabilidad perpetua

La noción de sistemas disipativos es de fundamental importancia no sólo para la teoría del caos sino para la comprensión del universo. Prigogine parte de la distinción entre sistemas: los hay en equilibrio, cerca del equilibrio y lejos del equilibrio. Éstos últimos se caracterizan porque son abiertos al intercambio de energía e información con su entorno, y en ellos se dan drásticos cambios de reorganización de la materia. A estas estructuras o sistemas se les denomina *disipativas*, porque consumen una gran cantidad de energía para mantenerse.

Cuando un sistema está lejos del equilibrio, pasa por un periodo caótico y finalmente arriba a un nuevo estado de orden diferente. A este fenómeno se le llama *autoorganización*: la espontánea emergencia del orden en sistemas físicos y naturales (Kauffman, 1993, p. 35) es un fenómeno independiente de las condiciones externas porque depende de fenómenos como la no linealidad, la retroalimentación, la presencia de estructuras

fractales y una dependencia sensible hacia adentro de la estructura o sistema en el que ocurre.

La autoorganización es la habilidad de un sistema para reorientar y reformar sus patrones de operación mediante la mutua adaptación de sus componentes a las necesidades y capacidades cambiantes, así como a las demandas y oportunidades mutables del entorno. Es resultado entonces de procesos de comunicación, selección y adaptación dentro del mismo sistema y entre el sistema envolvente y la base del aprendizaje en el sistema y de la innovación misma.

## Sistemas al borde del caos

Aplicados esos conceptos a la descripción de la dinámica de comportamiento de los sistemas adaptativos complejos al mantenerse en precario equilibrio, ofrecen oportunidades al sistema para sobrevivir, medrar y establecer las conexiones con el pasado, necesarias para el aprendizaje y la reproducción (ideas asociadas con la homeostasis). Pero también, al mismo tiempo, la inestabilidad de sus desplazamientos y movimientos son una importante oportunidad para la innovación y el surgimiento de soluciones creativas a sus problemas internos o de adaptación al entorno.

Son sistemas dinámicos que cambian perpetuamente en el tiempo y el espacio: la identidad de sus partes como la del todo se transforman continuamente. Además, a estos sistemas suele conocerseles como no lineales en el sentido en que los cambios producidos en el sistema no son proporcionales a las causas. Dicho de otra manera, una ligera variación de las condiciones iniciales en un sistema puede provocar grandes variaciones en los resultados finales del mismo como indica Lara Rosano (2010):

La dinámica al borde del caos se caracteriza por una ley de potencias, lo que significa que hay un pequeño número de eventos de extinción grandes y gran número de pequeños eventos de extinción.

Una ley de potencias que lo mismo determina cierta estabilidad —donde las extinciones grandes son raras—, que inestabilidad, en la cual ocurren muchos pequeños eventos de extinción. Esta característica de los sistemas caóticos es vista por los especialistas como una fuente importante de novedad y diversidad.

Más allá de los modelados computacionales y matemáticos, el caos es *una propiedad universal* de los sistemas con retroalimentación no lineal, fenómenos de autoorganización e inestabilidad o sea, caóticos. Sardar

(2006, p. 77) ofrece la siguiente relación sintética de las características de los sistemas complejos autoorganizados:

- Son abiertos a su entorno, pero pueden mantener simultáneamente una estructura lejos del equilibrio.
- Se oponen a la segunda ley de la termodinámica que indica que todo tiende al caos y al desorden molecular y no hacia el orden.
- El flujo de energía e información en estos sistemas les permite autoorganizarse espontáneamente, con lo cual mantienen y recrean una estructura lejos del equilibrio. Son creativos, pues pueden, si es necesario, generar nuevos comportamientos o direcciones de desarrollo.
- Estos sistemas son complejos de dos formas: sus partes son tan numerosas que no puede establecerse claramente una relación causal; y sus componentes se interconectan a través de una red con numerosos bucles de realimentación.

### Elementos y nociones universales de la Teoría de Sistemas Caóticos

En primer término, es preciso entender a la naturaleza y la sociedad humana como integrados por múltiples sistemas (recuérdese el principio inicial enunciado por Morin) y dejar de considerarlos, a su vez, como sistemas simplemente reactivos y lineales, explicables y manejables por el sentido común. Es preciso enfocarlos en contraparte, como sistemas dinámicos, no lineales, interactivos, capaces de adaptación, aprendizaje e innovación y con una tendencia a estructurarse en redes complejas.

Al enfrentar un problema u objeto de estudio, de acuerdo con este paradigma, una porción de la realidad debe ser conceptualizada como un todo o un *sistema indivisible*, pues sus características peculiares desaparecerían si es dividido o segmentado: se trata de una categoría a partir de la cual se puede desarrollar un proceso de interpretación de la realidad en que porciones de ésta se estructuran funcionalmente en un modelo explicativo, primero conceptual y posteriormente matemático.

## Zadeh y Desoer y el enfoque de estados del sistema

Un sistema indivisible, a su vez, está compuesto por un conjunto de individuos, elementos o agentes usualmente denominados como *integrantes* que cumplen con tres condiciones:

- Todos los integrantes están interrelacionados entre sí en grados e intensidades diversos.
- El comportamiento de cada individuo afecta el comportamiento del todo a partir de reglas sencillas de operación local.
- La forma en que ocurre la afectación del todo por parte de algún elemento depende de, por lo menos, uno de los demás integrantes.

Si bien el sistema es una unidad indivisible depende, en buena medida de las dinámicas, acciones y comportamientos de sus integrantes, pero no deja de tener un nivel jerárquico superior al de esos integrantes.

Dicha noción de indivisibilidad (el sistema focalizado no se puede dividir) enfatiza el hecho de que posee un conjunto de propiedades que no dependen de la suma de sus partes sino de la emergencia de características derivadas del comportamiento o la dinámica de sus integrantes *en un momento determinado* (porque no es estático y tiene o ha tenido una evolución en el tiempo); y a dicho conjunto de propiedades puede asignárseles un *valor cualitativo o cuantitativo*. Son valores que dependen, como se ha dicho, del momento y el contexto determinados en que se encuentre el sistema.

Tal momento o contexto determinado que caracterizan al sistema recibe el nombre de *fase o estado* y las propiedades que el sujeto o sistema evidencia en un momento determinado reciben el nombre de *variables de estado*. Dichas características o propiedades asumidas por el sistema, como se ha dicho, no son estáticas y cambian o evolucionan con el tiempo, lo que determina que, si desea conocerse con detalle el origen de las características del sujeto, debe hacerse el recuento de las fases por las cuales ha pasado el sistema en un tiempo determinado. Es preciso conocer entonces lo que se conoce *como espacio de estados o espacio de fases*.

En resumen, un sistema tiene en momentos sucesivos un estado específico (y puede que nunca sea el mismo si se trata de una entidad o sistema complejo), evidencia una *trayectoria evolutiva en un espacio de estados*. Conocer con el mayor detalle y cuidado esta trayectoria del sistema o del individuo en el tiempo permite caracterizar y describir el tipo de sistema de que se trata, e inferir el tipo de dinámicas o comportamientos que tienen lugar en su interior. De ahí que el conocimiento del espa-

cio de fases o estados sea de fundamental importancia dentro de este paradigma metodológico.

A esa trayectoria de un sistema en su espacio de estados se le conoce como *ley de evolución*, porque está constituida por reglas dinámicas y estáticas, que a su vez están sujetas o determinadas por las restricciones peculiares del sistema de que se trate y por la acción de factores externos al sistema usualmente denominadas *parámetros externos o exógenos*.

Porque los sistemas no sólo asumen estados de fase determinados por su trayectoria en el tiempo y por el comportamiento o dinámicas de sus integrantes. Están determinados, a su vez, por otros sistemas y por el contexto en el cual se mueven. Los sistemas no *viajan* solos en el tiempo. Recuérdese que el principio básico de esta metodología es “abstraer” una porción de la realidad mediante la identificación de un sistema indivisible; pero esta abstracción, al mismo tiempo, implica la existencia de un contexto formado por otros fenómenos y sistemas que afectan e influyen de múltiples maneras el sistema estudiado.

Se tienen, en consecuencia, planos distintos. Todo sistema complejo *es abierto, interactúa con su ambiente y puede establecer relaciones de cooperación o competencia con otros sistemas del entorno*. Las relaciones que se establecen en un sistema complejo, entonces, no se limitan a las interacciones entre sus propios elementos o integrantes (que pueden ser no sólo de relación directa entre elementos, agentes o integrantes, sino de relación indirecta; relaciones no lineales de las cuales nos ocuparemos más adelante), sino a las relaciones de ese sistema con otros sistemas del entorno.

Y esas relaciones entre sistemas pueden y suelen ser de subordinación en escalas cada vez más grandes. Un sistema tiene dentro de sí, subsistemas menores, depende, a su vez, de sistemas mayores y más “abarca-dores”. Una suerte de jerarquía de relaciones sistémicas en donde las partes no son simplemente aditivas, sino que se afectan unas a otras (Lara Rosano, 2011). A esta noción de la realidad integrada por sistemas de todo tipo, tamaño y evolución en el tiempo se denomina *jerarquía sistémica o heterarquía fractal*.

Ningún sistema existe aislado. Todo sistema es parte de otro de mayor jerarquía que lo abarca o “envuelve”, conocido como *suprasistema*; y a su vez, contiene otros elementos o integrantes organizados en la forma de sistemas menores llamados *subsistemas* interrelacionados en distintos niveles jerárquicos, hasta llegar a los integrantes o componentes elementales. Y las relaciones que se dan entre esos distintos niveles de subsistemas y entre los integrantes últimos son de carácter dinámico (perpetuamente

cambiantes) y no lineales (no son unidireccionales), y suelen mostrar recursividad y retroalimentación a través de numerosos bucles.

Cada uno de esos niveles: sistemas y subsistemas, comparten las mismas propiedades, pero con grados diferentes de complejidad; acaso menos integrantes o menos interrelaciones entre sí, etcétera. A esta cualidad suele llamársele *recursividad*: un subsistema es un recurso de un sistema y éste, a su vez, lo es de un suprasistema. De igual forma, esta categorización o nomenclatura que se deriva de la jerarquía sistémica, implica un punto de vista que varía de acuerdo con el nivel de análisis donde el observador se ubique: para un estudioso de un sistema educativo, por ejemplo, el nivel de análisis (su sistema-objeto de estudio), puede ser un curso, o un diseño curricular o, incluso, una clase. Y a partir de ahí construirá su modelo conceptual.

## Sistemas causales y teleológicos

Los sistemas son entidades que pueden ser caracterizadas no sólo por su capacidad de intercambio con el entorno (cerrados o abiertos, siendo los abiertos más próximos a la noción de complejidad); también pueden ser caracterizados por el enfoque empleado para lograr su comprensión. Si se emplea un enfoque determinista, implica que se destacarán los aspectos causales que le dieron origen al sistema en el pasado.

Por el contrario, si en el sistema intervienen agentes o elementos humanos y sociales, siempre impregnados de objetivos y sentidos dirigidos hacia el futuro a partir de un presente, entonces se habla de sistemas teleológicos y el enfoque para comprenderlos será, por supuesto, teleológico, hermenéutico o comprensivo, en el sentido que Max Weber otorgara a ese término. Mainzer señala que en el estudio de los sistemas sociales, animales y humanos, es imposible separar el análisis teleológico del causal, lo cual incrementa el nivel de complejidad requerido para comprender tales sistemas en los cuales es preciso considerar los mecanismos causales y los mecanismos teleológicos y anticipatorios que modelan el comportamiento del sistema y de sus integrantes. El esquema siguiente ilustra ambos tipos de sistemas.

## Sistemas Adaptativos Complejos

Como se ha visto en el capítulo 3, sobre las ideas desarrolladas en el ámbito de la sociología y la filosofía social sobre la teleología y la hermenéu-



tica humana, hay muchos aspectos por revisar y discutir en su relación con la Teoría de los Sistemas Complejos. Tales sistemas adaptativos, indica Lara Rosano, cuando están impregnados de sentido humano, de propósitos y metas, apuntan siempre hacia el futuro, aún cuando las metas u objetivos colectivos no lleguen a cumplirse a cabalidad.

...hay interés por los sistemas con un propósito[...] que puedan mostrar elección tanto en el medio como el fin. Casi todo el interés que tienen los sistemas puramente mecánicos proviene de su uso como herramientas por parte de los sistemas con un propósito[...] aquellos sistemas con un propósito cuyos componentes tengan también un propósito, con grupos (en especial, en los grupos cuyos componentes realizan distintas funciones, las organizaciones). (Ackof, 1979: 22-23.)

Revisten particular interés, entonces, los sistemas adaptativos complejos de tipo teleológico, que si bien no prescinden (no podrían) de las relaciones causales, denotan un entresijo de relaciones teleológicas hacia adentro de sus subsistemas hasta llegar al último de sus componentes, como hacia “arriba”, en su relación con su entorno o con sistemas similares o de mayor rango. Se trata, en palabras de Ackoff, de relaciones con propósitos o intenciones que suscitan relaciones y problemas derivados de:

- los propósitos del sistema mismo;
- los propósitos de sus componentes, y
- los propósitos de los suprasistemas del cual forma parte el sistema.

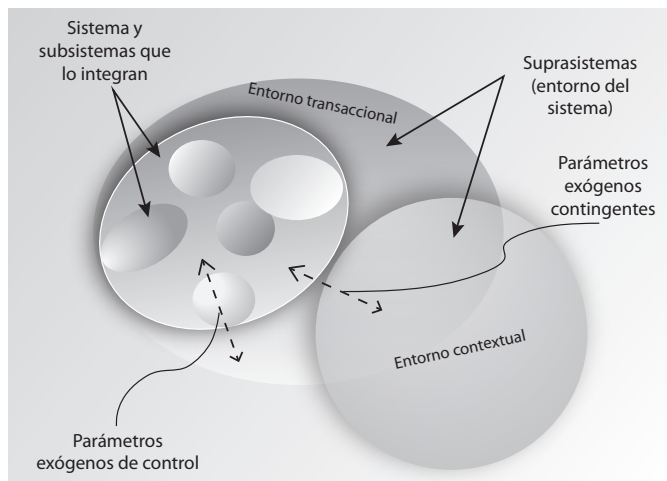


FIGURA 2. Sistema y entornos

<p>Se componen de una gran cantidad de elementos</p>	<p>Si el número de elementos de un sistema es relativamente pequeño, el comportamiento de esos elementos frecuentemente puede ser descrito en términos convencionales. En contraparte, si el número llega a ser demasiado grande, los medios convencionales (por ejemplo, un sistema de ecuaciones diferenciales) no sólo resultan poco prácticos, sino que también dejan de ser útiles para la comprensión del sistema.</p>
<p>Un gran número de integrantes es necesario, pero no suficiente</p>	<p>Para constituir un sistema complejo, los elementos tienen que interactuar y esas interacciones deben ser dinámicas. Los granos de arena en una playa no interesan como sistema. Lo mismo ocurre con las moléculas en una sustancia o un gas. Al respecto, señala Kauffman, que cuando el número de integrantes e interacciones se incrementan dentro del sistema, éste sólo es capaz de conseguir soluciones pobres o limitadas.</p>
<p>Los integrantes no son una mera agregación</p>	<p>Los componentes interactúan y esa interacción genera estructuras complicadas y un orden nuevo o respuesta adaptativa.</p>
<p>La composición sistémica da propiedades peculiares a un sistema</p>	<p>No se trata de una mera interacción, sino que los sistemas son totalidades con propiedades propias.</p>
<p>La composición sistémica produce alta complejidad</p>	<p>A gran escala la composición sistémica produce por evolución emergente alta complejidad.</p>
<p>Tienen propiedades resultantes</p>	<p>Son cualitativamente similares a las de los integrantes. La propiedad es la agregación de las propiedades de las partes del sistema.</p>

<p>Tienen propiedades emergentes</p>	<p>Son propiedades que no se presentan en ninguna de las partes o integrantes del sistema si se consideran aisladamente. Resultan de una organización específica de integrantes, de su interacción, del estado evolutivo en que se encuentre y del contexto específico. Como ejemplo tenemos a un gas sometido a la presión o a temperaturas altas.</p>
<p>Las interacciones entre elementos no tienen que ser físicas</p>	<p>También pueden ser mensajes o transferencias de información. Las señales bioquímicas entre las neuronas, las marcas feromónicas entre los integrantes de un termitero son ejemplos de esto.</p>
<p>Riqueza en la interacción</p>	<p>Cualquier elemento o integrante influye y es influido por el sistema, así como por un buen número de otros integrantes. Pero el comportamiento del sistema no está determinado por una cantidad exacta de interacciones asociadas con elementos específicos. Una serie de integrantes escasamente conectados puede realizar las mismas tareas que uno solo ricamente conectado. Los <i>hubs</i> o terminales aéreas en un país con pocos aeropuertos, los tendidos de cableado telefónico en las ciudades o de sitios en la <i>web</i> ejemplifican lo anterior.</p>
<p>La interacción debe ser no lineal</p>	<p>Es una precondition de la complejidad. La no linealidad garantiza que pequeñas causas puedan generar grandes resultados y viceversa. Grandes sistemas lineales colapsan en comparación con otros de menor rango que denotan dinámicas recursivas.</p>

<p>Las interacciones usualmente son de rango corto</p>	<p>La influencia de un integrante hacia otro es más rápida y eficaz si es cubierta en unos pocos pasos. Resultado de esto, es que la influencia puede ser modulada de varias maneras durante el camino: puede ser suprimida, ampliada o alterada. Las interacciones de rango largo no son imposibles, pero no garantizan una gran influencia y puede tener serias dificultades para llegar a su destino.</p>
<p>Las interacciones son recurrentes</p>	<p>El efecto de cualquier actividad puede retroalimentarse. El <i>feedback</i> o retroalimentación si es positivo, mejora, estimula e incrementa el cambio en el sistema; si negativo, inhibe y estabiliza. Ambos tipos de interacción son necesarios y suelen convivir en los sistemas complejos.</p>
<p>Usualmente son sistemas abiertos</p>	<p>Establecen relaciones cooperativas con otros sistemas del entorno. Interactúan con su entorno de forma tal que resulta difícil establecer los límites del sistema. De ahí que el alcance del sistema esté usualmente determinado por los propósitos de quien elabora la descripción del sistema (<i>framing</i>).</p>
<p>Operan lejos del equilibrio. Son homeostáticos</p>	<p>Tiene que haber un flujo constante de energía para mantener la organización del sistema y para asegurar su supervivencia. Equilibrio equivale a muerte. De ahí que se afirme que su comportamiento no sea rígidamente estable ni caótico, sino que se mantiene al <i>borde del caos</i>, en una zona que les permite cambiar drásticamente si fuera necesario. No son homeostáticos completamente para permitir movimientos aleatorios que estimulan la creatividad y la innovación.</p>

<p>“Navegan” en estados moderadamente inestructurados</p>	<p>Los cambios que los caracterizan son lentos que proveen condiciones para la supervivencia del sistema por las conexiones con el pasado requeridas, el aprendizaje, el análisis y la reproducción.</p>
<p>Un sistema complejo cambia con el tiempo</p>	<p>Los sistemas complejos tienen historia. Su pasado es corresponsable de su comportamiento presente. Su estudio debe ser diacrónico.</p>
<p>Los integrantes son ignorantes del comportamiento del todo</p>	<p>Cada integrante sólo responde a la información que está disponible en sus inmediaciones. La complejidad es el resultado de una rica interacción de elementos simples que responden a un rango limitado de información.</p>
<p>Las interacciones entre elementos obedecen a reglas sencillas</p>	<p>La acción colectiva de muchos elementos que se ciñen a reglas o leyes simples sin un control centralizado hace emerger la complejidad. Hormigas, células cerebrales, creadores de sitios web, ejemplifican esta condición.</p>
<p>Un sistema se “nutre” por igual, de información y señales generadas en su interior o en su exterior</p>	<p>La condición de “apertura” señalada antes, está determinada por esta condición: el sistema no es autógeno, sino abierto al intercambio con su entorno y con sus propias dinámicas internas.</p>
<p>Son adaptativos</p>	<p>Emergen de la interacción de sus integrantes y de la retroalimentación positiva y tienden a cambiar su comportamiento para adaptarse al entorno exterior de competencia y mejorar sus oportunidades de supervivencia y éxito, mediante aprendizaje o la evolución (o selección natural).</p>

ELABORADO con base en Cilliers (1999), Mitchell (2009), Mainzer (2007), Yaneer Bar-Yam (1997), Kauffman (1993) y Lara Rosano (2010).

En el mismo sentido, vale destacar la manera en que Monod sugiere clasificar los sistemas por la forma en que la intencionalidad actúa en un sistema en particular y que refuerza la idea de en los sistemas complejos, las fuerzas que actúan y determinan dinámicas al borde del caos no son determinantes por sí mismas, sino que actúan, por así decir, multifactorialmente: la finalidad no gobierna siempre los procesos dentro de un sistema. Se dan efectos diferentes cuando la finalidad dirige y asegura la emergencia, que cuando, por el contrario, la emergencia precede a la finalidad.

## Propiedades comunes de los sistemas complejos

Como síntesis sumaria para tener una guía metodológica de lo que en adelante será utilizado como referencia constante en los siguientes cuadros se ofrece una síntesis de las propiedades y características más señeras de los sistemas adaptativos complejos.

### La Teoría de redes complejas

¿Es la complejidad un asunto de cantidades? De acuerdo con lo revisado hasta aquí, es claro que no. Sin embargo, la mayoría de los autores coinciden en que, cuando se habla de sistemas complejos, inevitablemente se habla de un gran número de integrantes o participantes. Puede considerarse entonces sin ambages que uno de los más notorios atributos de la complejidad, donde quiera que se manifieste, es la gran cantidad de elementos participantes en ella.

Pero no se trata de una mera agregación de elementos inertes sino de algo más, unas pocas partes o elementos juntos interactuando mutuamente: modificándose de diversas maneras a través fenómenos de comunicación, conectividad e interdependencia múltiple. Y ese sistemas de relaciones entre elementos o participantes determina en ellos un comportamiento diversificado, pero además eso es precisamente lo que hace surgir al sistema mismo.

Por ello, señala Melanie Mitchell (2009, p. 34), que al caracterizar a los sistemas complejos, es preciso concentrarse en las relaciones entre las entidades más que en las entidades mismas. Para ello, desde tiempo atrás, con progresivo éxito los estudiosos han establecido que para comprender de mejor manera este rasgo de todo sistema, es preciso representar muchas situaciones reales como redes que, en una caracterización simple, pueden visualizarse como conjuntos de objetos que se asocian de múltiples formas con diversas consecuencias.

En las ideas anteriores se fundamenta la noción de red, que a su vez caracteriza la noción de sistema: un sistema de relaciones específicas que pueden representarse como redes. El sistema se mantiene, se “estaciona”, se “mueve” en ciertas direcciones o hace otras operaciones, gracias a esas redes de relaciones, o dicho en palabras de Barabási (2007, p. 33):

...en los sistemas complejos, las interacciones forman redes, donde cada nodo interactúa con sólo un pequeño número de socios seleccionados y cuya presencia y efectos pueden ser percibidos por nodos lejanos.

Las nociones de cantidad y relacionalidad evocan una conceptualización específica. Es decir: afirmar que algo es complejo implica establecer qué tipo de lazos existen entre las entidades de un sistema dado o en una porción de la realidad (Faust, 2002, p. 4). Y precisamente esa porción de la realidad puede individualizarse de otras por el tipo de relaciones que las caracterizan. A las porciones de la realidad así identificadas se les llaman sistemas complejos.

Un sistema complejo es un conjunto de objetos, integrantes, sujetos o agentes que interactúan en diversos planos y con distinta fuerza y reiteración, como una colonia de insectos que cooperan para erigir un grande y elaborado nido vital para la preservación de la propia colonia. Porque la noción de *red* puede hacerse extensiva a toda la naturaleza (o buena parte de ella), y a otros fenómenos del universo.

Es una noción poderosa y de gran utilidad, siempre y cuando se utilice como modelo y que la atención se dirija hacia las interdependencias entre entidades, participantes o integrantes de un sistema o, como veremos, entre los sistemas mismos. El interés y gran utilidad de la teoría-metodología de las redes complejas, en consecuencia, está centrado en la búsqueda de las propiedades relacionales entre entidades, agentes o integrantes de los sistemas.

### La arquitectura de los sistemas: redes por todas partes.

El cerebro es una red de células nerviosas conectadas por axones, y las células en sí mismas, son redes de moléculas conectadas por reacciones bioquímicas. Las estructuras atómicas de los cristales (cuya simetría traslacional suele representarse como una red de átomos), o las moléculas de otros elementos están estructuradas, nos dicen los químicos, por enlaces atómicos débiles o fuertes. Son redes. Aún las llamadas “moléculas de la

vida”, el Ácido Ribonucleico (ARN) y el Ácido Desoxiribonucleico (ADN), están representados por una intrincada red en la que participan glúcidos, lípidos, proteínas y ácidos nucleicos.

En una escala mayor, macroscópica, las cadenas alimenticias y las dependencias entre especies, como la simbiosis o el parasitismo, pueden ser representados como redes intra e inter especies (de ahí que a muchas se les conozcan como *redes tróficas*, y ayudan a establecer quién se come a quién, o quién se come qué). Las sociedades también son redes de relaciones entre individuos y grupos enlazados por la amistad, el interés, el encono, los compromisos societarios o profesionales, etcétera.

Hay redes en todas partes y en muchas escalas. Las redes *son comunicación* y por tanto son la arquitectura misma de los sistemas complejos. Sin la comprensión de las redes, señala Barabási, no se puede hablar de una Teoría de la Complejidad (2007, p. 33)

## Tipos universales de redes

Hay varias formas de aproximarse al estudio y descripción de las redes complejas. Una manera didáctica, está inspirada en los aportes de Watts y Strogatz (1998), y se basa en la descripción y comparación entre tipos generales de redes, al tiempo que se destacan las propiedades universales de tales redes y los desarrollos matemáticos que les van aparejados. El que se ofrece a continuación sigue aproximadamente esa ruta. De acuerdo con lo dicho en los párrafos precedentes, es posible detectar que una de las propiedades de todo sistema es su arquitectura íntima de redes. Y estas redes pueden encontrarse tanto en sistemas naturales cuanto artificiales. Esos tipos generales de redes son:

## Redes físicas y biológicas

Las redes regulares abundan en la organización cristalina de los sistemas inertes. Basta ver la representación clásica de las moléculas para comprobar esto. Pero hay ejemplos menos aburridos como son las redes de conformación de los polímeros y las transiciones entre ellos (un campo muy apreciado por la nanotecnología), que presentan propiedades estructurales que sólo pueden ser entendidas y explicadas mediante el modelado reticular de su topología (Doye, 2002). Lo mismo ocurre con las redes de energía libre (*free energy landscape paradigm*) y los puntos de confluencia (sillares) en los vidrios, los cuales exhiben, por cierto, comportamientos



muy interesantes y aún no comprendidos del todo (Dasgupta, Chandan, 1999). Estos son ejemplos del modelado con redes que campean entre las fronteras de la Física, la Química o la Biología.

Más particularmente, hay muchos sistemas biológicos que pueden ser representados como redes, además de los ejemplos señalados antes (las cadenas tróficas). Los sistemas metabólicos en los seres vivos suelen ser un ejemplo muy socorrido de tales sistemas: las relaciones entre bases y sustancias que reaccionan o desencadenan y generan nuevos productos como el famoso ciclo de Krebs. Otro ejemplo serían las redes de interacciones físicas entre proteínas o la clásica red de transmisión genética, que se expresa en la producción por transcripción y traslado de ácidos y proteínas:

Las redes de regulación genética fueron, de hecho, uno de los primeros intentos de modelado de sistemas con redes dinámicas. Los primeros trabajos sobre redes booleanas aleatorias realizados por Kauffman [1969, 1971, 1993], son clásicos en ese campo y se anticiparon por varias décadas a muchos hallazgos recientes (Newman, 2003, p. 8).

Un área más de la biología y la medicina en la cual se aplica frecuentemente el modelado con redes es en los estudios alométricos, es decir, los sistemas circulatorios sanguíneos y en los sistemas vasculares de las plantas. Estudios que han establecido con mucha claridad la importancia de las redes de suministros, deshechos, temperatura y regulación hormonal para un sistema orgánico complejo (West & Brown, 1999).

Por supuesto, en esta área del modelado con redes biológicas no puede faltar la mención a los trabajos sobre la estructura reticular de las neuronas cerebrales. Aunque es un campo extremadamente difícil de abordar, se tienen registrados grandes logros, de entre los mejor conocidos se encuentra la descripción funcional del sistema nervioso del gusano *Caenorhabditis Elegans*, compuesto por apenas 282 neuronas (White y otros, 1986), cuya sencillez ha permitido explorar con más precisión la complejidad de la trama neuronal del cerebro humano a grandes escalas de interconexión, sea por regiones funcionales o por trayectorias. De entre la pléyade de trabajos en ese campo destacan los de Sporns (2002).

## Redes tecnológicas

En la categoría de redes tecnológicas entran todas aquellas creadas por el hombre: desde las que transportan insumos, bienes, servicios y formas de traslados: aviones, barcos, carreteras; hasta aquellas que distribuyen energía eléctrica e información: telégrafo, teléfono, redes satelitales, etcétera, incluida por supuesto la *internet*.

La enorme y complicada “parrilla” de interconexiones eléctricas trifásicas de alto voltaje que surcan buena parte de la superficie de los países modernos ha sido objeto de estudios estadísticos muy completos y han arrojado ejemplos de cómo una red elemental puede tender fácilmente hacia una red compleja, en una relación directamente proporcional con el crecimiento poblacional, la colonización de nuevas superficies para habitarlas, y el natural crecimiento de la demanda. Y esto sin la planificación de esas redes (Watts & Strogatz, 1998, 1999) y Amaral, Barthélémi y otros (2000). Otros ejemplos de estas *redes artificiales de distribución y comunicación* son los tendidos telefónicos, los circuitos electrónicos de todo tipo y las redes satelitales.

Las rutas navieras, terrestres o aéreas, así como las vías peatonales, no han dejado de ser punto de interés para el modelado con redes (Chowell, Hman y Eubank, 2002). Son frecuentemente citados los trabajos sobre rutas terrestres, de ferrocarriles, caminos y carreteras de Estados Unidos elaborados por Kalapa, Sanwalani y Moore (2003), y Latora y Marchiori (1999), sobre las rutas del tren subterráneo y los mecanismos de interrelación social que propician. Igualmente, suelen considerarse como un ejemplo importante de redes libres de escala de las rutas aéreas y el entramado de aeropuertos (Amaral, 2000).

Parte central de esta investigación y ampliamente estudiada, la *internet* también forma parte de la categoría de redes artificiales de distribución y comunicación. Esta suele ser entendida como una red física de computadoras interconectadas que forman sistemas de redes públicas y privadas traslapadas e interrelacionadas de múltiples maneras, no sólo por conexiones simples, sino recursivas. Los estudios sobre esta red son abrumadoramente abundantes pero no muy específicos, pues están centrados en los *routers* o grupos de computadoras que tienen propósitos específicos: el control de flujo de datos de los “sistemas autónomos”, los cuales aproximadamente coinciden con los nombres de dominio.

La arquitectura precisa de interconexión física de internet es muy difícil de conocer, señala Newman (2003, p. 10), por la simple y sencilla razón de que la infraestructura y los distintos dominios están administrados por muchas organizaciones no vinculadas entre sí, de manera que

la mayoría de los estudios se enfocan en la descripción de patrones generales de rutas trazadas a partir de las conexiones evidentes entre *routers*. Tales “mapeos” o descripciones suelen omitir numerosas “orillas” de la inmensa red. Son profmente citados respecto de la investigación sobre la topología y las leyes de poder que le son inherentes, entre otros: Faloutsos y Faloutsos (1999), Broida y Claffy (2001, 2004), y Chen, Govindan, Jamin, Shenker y Willinger (2002).

## Redes de información y conocimiento

Una categoría menos “dura” (porque depende, *pero no*, de los “fierros”), es la conocida como *redes de información o del conocimiento*. Se trata de aquellos vínculos mediante los cuales la humanidad intercambia datos e información de todo tipo, que resultan en intercambios útiles para la construcción de saberes o conocimientos. Aquello que se exaltara en el pasado reciente como los “templos de las ms” (los museos y galerías), las bibliotecas, los congresos, coloquios y seminarios. Puntos en los que socialmente se dan cita de manera permanente o temporal las personas para intercambiar sus hallazgos, especulaciones o teorías sobre los asuntos más diversos.

Dado que es más difícil “mapear” o establecer descripciones de redes de ese tipo de intercambios, uno de los casos más conocidos y mejor documentados dada su accesibilidad para establecer relaciones de intercambio, son las llamadas redes de citas a través de trabajos (*papers*) académicos, si bien son redes dirigidas *acíclicas* (es decir, cuyas aristas o líneas de relación apuntan en una sola dirección y que no se cierran o “*loopean*” sobre sí mismos, o regresan porque hay artículos-respuesta, que aún no han sido escritos). Son usualmente circuitos abiertos.

En redes de este tipo, refieren White, Wellman y Nazer (2003 y 2005), los vértices son los artículos o *papers* académicos representan información almacenada, mientras las aristas dirigidas son las líneas que se construyen para indicar que fulano citó a mengano. Aunque por supuesto, de los complejos patrones que se establecen de esta manera, también pueden extraerse interesantes aspectos de *relacionalidad* social, como podría ser quiénes y en qué lugares o universidades se intercambia más información científica sobre tal o cual campo, en qué lugares del mundo se invierte más dinero para fomentar ese intercambio, quién es el más acertado en ciertos temas, etc. De hecho, esta brevísima síntesis sobre Teoría de Sistemas Complejos y Redes Complejas, se ha construido siguiendo el

criterio de qué autores han sido y son los más recurrentemente citados en los temas revisados.

Los estudios sobre las redes de intercambio de información, como se dijo, están bien documentados y tienen antecedentes de larga data. Uno de esos antecedentes muy recurrentemente citado, es la llamada *Ley de productividad científica* enunciada en 1926 por Alfred James Lotka (el creador del modelo matemático depredador-presa, junto con Vito Volterra), según la cual el número de trabajos publicados por científicos en lo individual, sigue una ley de potencia. Otros trabajos basados en análisis de citas en bibliografías especializadas son de Eugene Garfield (1960), Price, (1965) y Seglan y Redner (*The Skewness of Science*, 1992, *How popular is your paper?* 1998), entre muchos otros.

Con el advenimiento de la publicación en línea en sitios bien acreditados (por su impecable administración, puntualidad y rigor), en los años recientes se ha desarrollado un sistema semiautomatizado que traza patrones de relaciones en redes de citas entre *papers* publicados *on line*. Destacan los ejemplos de estos mapeos, los ejecutados y dados a conocer en sitios como SPIRES, Citeseer y Citebase, entre otros.

Otras redes de información que cuentan con una copiosa investigación publicada, son las redes de innovación tecnológica documentable a través de inventos registrados en las oficinas de patentes (Trajtenberg y otros: *Patents, Citations and Innovations: A Window on the Knowledge Economy*, 2002). Sin embargo, estas redes acusan un limitado rango de alcance, dado que suele limitarse al registro de inventos de los países más desarrollados.

Investigaciones más recientes se han centrado en las relaciones persona a persona establecidas a través de sitios en la *web*: visitas a *blogs*, intercambio de documentos y uso de programas especializados que se pueden cuantificar. Otros más, se han enfocado en la identificación de patrones de relaciones establecidas a partir del uso específico de ciertas palabras en aquello que puede considerarse como una red de conceptos que emula un lenguaje. Investigaciones en ese sentido pueden consultarse en Knuth (1993), Motter, de Moura y Lai (2002).

A diferencia de *internet*, la *web* no es una red de “fierros” enlazados entre sí por cables, líneas de fibra óptica, microondas o cualquiera otra forma de conexión, sino de una red que carece de una conexión secuenciada o lineal; más bien es cíclica y al mismo tiempo abierta a la posibilidad de crear múltiples ciclos cerrados, bucles o *loops* (Lara Rosano, entrevista, diciembre 2011). Una red con características muy peculiares pues obedece a leyes de potencia, presenta fractalidad, autoorganización y grados variables de distribución entre otras características.

Conocer a la propia *web*, equivale a crear otro bucle más, sugiere Newman (2003, p. 7), puesto que los datos que suelen emplearse para conocerla provienen de ella misma: de páginas que a su vez se ligaron a páginas y otras más, etc. La imagen de la estructura de red de la *web* usualmente obtenida es por lo tanto parcial, porque muchas páginas con bajos grados de conexión tienden a ser subestimadas aún si contienen información que podría ser relevante.

Lo anterior no obsta para que haya un abundante registro de investigaciones sobre esta red de información a grado tal que resulta difícil establecer criterios de discriminación para consultarlas. De entre las mayormente citadas se encuentran las que estudiaron el fenómeno tempranamente, como Barabási, Albert y otros, y especialmente “*Scale-free characteristics of random networks: The topology of the www*”.

Broder, Kumar, Maghoul y otros (“*Graph Structure in the Web*”), Kleinberg, Kumar, Raghavan y otros (“*The Web as a Graph*”) y Flake”, Lawrence Giles y otros (“*Self organization and identification of Web communities*”), y muchos otros.

En la relación instrumento-información-conocimiento que puede inferirse de la *web* (las formas de flujo de información y la construcción colectiva de conocimiento), respecto de *internet* (el medio, el instrumento en perfeccionamiento y crecimiento ilimitados), y los usuarios (emisores y receptores, millones de ellos), acaso nos de claves de la forma en que la humanidad construye gradualmente una forma distinta de organización.

## Las redes sociales

Las redes sociales existen desde hace millones de años, mucho antes que los humanos y el interés por investigarlas tampoco es nuevo. Han sido objeto de estudio de las matemáticas desde siglos atrás, y en el campo de las ciencias sociales es posible detectar trabajos pioneros ya en el siglo XIX y particularmente a inicios del pasado milenio.

Dentro de esas tempranas exploraciones son notables aquellas que discurren sobre los patrones de amistad en pequeños grupos (Moreno, 1920, 1934), la dinámica relacional de los grupos orientados a la tarea en fábricas investigada por Elton Mayo que diera lugar al desarrollo del *Management Science* (1930, 1949), y los aportes de Kurt Lewin y su *Teoría del Campo* donde aplicó los conceptos de la topología en grupos sociales

para establecer roles de liderazgo, membresía y la figura del *gatekeeper* (1932). Igualmente, en materia de matemáticas aplicadas al análisis social, destacan los esfuerzos pioneros de Anatol Rapoport para dilucidar el grado de distribución en redes sociales y los estudios de amistad entre niños de colegios estadounidenses (1956, 1961 y 1968).

Pese a los aportes mencionados, algunos de ellos muy notables, el progreso de esas investigaciones tradicionales fue lento y disperso hasta finales del siglo pasado. Tales investigaciones solían ser, afirma Newman, estudios inexactos y cargados de subjetividad, basados en muestreos, aplicación de dinámicas, entrevistas y cuestionarios de todo tipo e implicaban un trabajo muy laborioso que arrojaba resultados parciales por el limitado tamaño de las redes que se podían observar (Newman, 2003, p. 6). Sin embargo, dada su originalidad, un experimento desarrollado por el sociólogo Stanley Milgram (1933-1984) en 1960 para conocer la naturaleza de las redes personales resultó de particular importancia para el desarrollo posterior de la Teoría de las Redes Complejas: él descubrió que el mundo, como suele decirse de manera coloquial, *es un pañuelo*.

Basado en el correo tradicional, se escogió como destinatario de una carta a un corredor de bolsa que vivía cerca de Boston en la costa este de Estados Unidos. Enseguida, numerosas copias de esa carta fueron entregadas a un grupo de personas (remitentes) que vivían en el centro del país (Omaha, estado de Nebraska), con la instrucción de entregar esa carta a algún conocido de su comunidad que pudiera “acercar” la carta a su destinatario (por motivos profesionales, de turismo o simplemente a través de conocidos en áreas geográficamente cercanas). El segundo receptor de la carta debería proceder de la misma forma: enviarla por correo o entregarla a alguien que pudiese acercar esa carta a su destino, y así sucesivamente.

Ninguno de los remitentes conocía al destinatario, y la carta sólo estaba rotulada con el nombre, la profesión y el área geográfica donde vivía. La estimación inicial de Milgram fue que serían necesarios unos cien “saltos” en la red social para que la carta llegara finalmente a su destino. Sin embargo, una vez concluido el experimento y con la mayoría de las cartas perdidas en el camino (sólo una cuarta parte alcanzó su objetivo), los resultados fueron sorprendentes: en promedio, la mayoría de las cartas requirieron pasar por las manos de seis personas para llegar a su meta. Cinco “saltos” intermedios en la red social: *un mundo pequeño*. O como lo bautizara J. Guare años más tarde en una obra de teatro que tuvo mucho éxito: *seis grados de separación*.

Ese conocido experimento no permitió describir ninguna red social real, pero sí permitió conocer una característica notable de cierto tipo de redes: dio pistas acerca de la verdadera longitud de trayectorias que se siguen en una red de conocidos, o dicho de otro modo, fue el inicio de un cambio de visión acerca del tejido social: con fenómenos de autoorganización sorprendidos que revelan que los enlaces fuertes no siempre son la vía más óptima para una interrelación; dar oportunidad a interacciones débiles u ocasionales pueden dotar a una red (y en consecuencia a un sistema) de una estructura global más favorable.

Con el desarrollo de la ciencia computacional y la generalización gradual del *corpus* teórico de las Ciencias de la Complejidad, el estudio de las redes se ha hecho más preciso y ha tenido un desarrollo notable. Tratadistas como Freeman (1996) y Scott (2000), destacan los estudios sobre las élites gobernantes, comunidades de negocios (Davis y Greeve, 1997) y las redes corporativas (Galaskiewicz y Marsen, 1978) e, inspirados o azuzados por la propagación de pandemias como el VIH, el estudio de las redes y patrones de contactos sexuales ha tenido un notable desarrollo y es posible encontrar innumerables publicaciones relacionadas (Klov Dahl, Potterat, Woodhouse y otros: “Social networks and infectious disease; The Colorado Springs study”; Krezschmar y otros (1996), entre una pléyade entera. Notables ejemplos de la diversidad de campos en los cuales se aplica el análisis de las redes sociales es la ofrecida por Faust (2002, p. 8).

## Redes sociales y matemáticas

Como se mencionó antes, en el área de la matemática el estudio de las redes o “grafos” han sido un área de estudio muy socorrida. Durante siglos se han estudiado sus propiedades en la búsqueda de leyes generales. Un grafo es la representación abstracta de un sistema en el cual los elementos, denominados nodos se relacionan entre sí mediante conexiones que indican la presencia de una interacción. Pero al igual que en la investigación en ciencias sociales, el estudio de los grafos siguió una trayectoria lineal y muy focalizada.

Los grafos que más recibieron atención hasta mediados del siglo pasado fueron los aleatorios, es decir, aquellos cuyos nodos se conectan siguiendo algún procedimiento aleatorio. Uno de los teóricos que se ocupó de ese tipo de redes fue Paul Erdős (1913-1996), quien aportó un modelo de construcción de sistemas simples mediante la vinculación de pares de nodos de manera aleatoria (un sorteo, una moneda al aire, etcétera). Pese a que estas redes suelen ser calificadas de “muy regulares” contienen pro-



iedades que resultaron ser muy útiles para el posterior desarrollo de la Teoría de las Redes Complejas.

En primer lugar, la progresión geométrica de una red aleatoria suele describir siempre una curva bien definida, en donde el número de conexiones de un nodo tiene su máximo pico al cumplir entre cinco y seis conexiones (o una cantidad proporcional, según el número de nodos o elementos participantes en la red). Menos conexiones (abajo de cinco hasta llegar a una), y más de cinco (por arriba de seis hasta llegar a diez), suelen ser muy escasas (véase la figura 3).

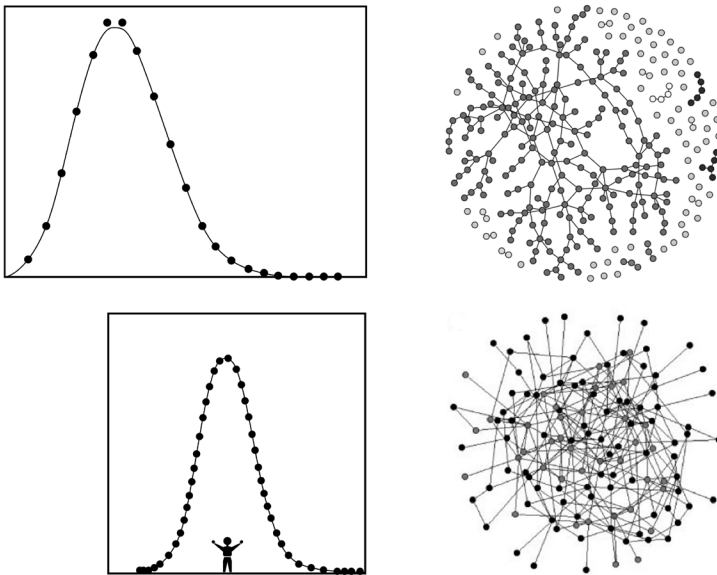


Figura 3. Ejemplos de red aleatoria obtenida por iteración del modelo de Erdős-Rényi. Las gráficas muestran la distribución de conexiones con la curva característica: el cénit de la curva indica el número de conexiones límite del sistema (cinco o seis). Antes y después de ese número decae. El número de nodos o vértices no varía. Fuente: Google imágenes 13 de enero de 2013.



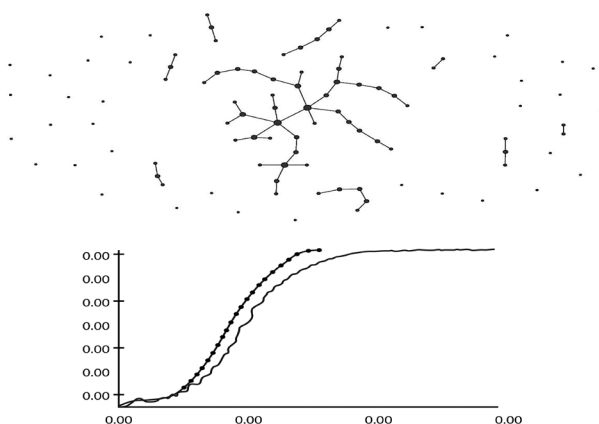


FIGURA 4. Transición de fase en el modelo Erdős-Rényi. En un punto crítico, cuando la mayor cantidad de elementos tiene una conexión, aparece un componente gigante. Fuente: Google imágenes, 13 de enero de 2013.

## El salto del grillo, o los chirridos sincrónicos de una red

Estos aspectos derivados de las investigaciones de Erdős dieron la pista para explicar con modelados matemáticos precisos el efecto del *mundo pequeño* demostrado en la realidad por Milgram, pero no explicado. Duncan Watts (1971-) y Steven Strogatz (1959-) dieron en 1998 con la explicación adecuada mientras estudiaban problemas relacionados con la comunicación entre ciertas especies: cómo es que cierto tipo de grillos sincronizan sus chirridos en un muy breve tiempo y de manera eficaz para atraer a las hembras.

Por asociación, ese problema de comunicación llevó al otro: ¿un mundo pequeño como el descubierto por Milgram no es comunicación eficiente en muy pocos pasos? Estas preguntas los llevaron a desarrollar modelos ideales de redes que permiten describir sistemas de todo tipo; de los más ordenados a los más desordenados. Uno de esos modelos resultó de gran importancia para explicar, al menos en el modelado matemático, el fenómeno de los “seis grados de separación”.

A partir de una red regular, en la cual cierto número de nodos o elementos dispuestos en un anillo se interconectaban de una manera regular con sus cuatro vecinos más próximos, descubrieron que al añadir unas cuantas conexiones al azar, la red ordenada y regular se transformaba en un mundo pequeño. Estos atajos abatían drásticamente un número enor-

me de conexiones entre individuos de la red, a unos cuantos pasos entre cualquiera de ellos (Watts y Strogatz, 1998, pp. 12-18).

El efecto de esos atajos es sorprendente. Si se extrapola esta propiedad a la red social real de aproximadamente 7 000 millones de individuos, la distancia entre dos personas ubicadas en polos opuestos del mundo es de aproximadamente seis “saltos”. Y si el ejercicio se hace extensivo a otros sistemas con un número muy grande de nodos o conexiones como el cerebro humano o *internet*, hay circuitos que ofrecen distancias muy pequeñas entre sus componentes gracias a esos atajos o “puentes” ubicados en puntos específicos de la inmensa red de elementos interconectados. Basta un pequeño número de esos enlaces para reducir enormemente la distancia entre nodos de una red. El mundo pequeño es una propiedad universal de todas las redes complejas.

Esta extrapolación de un modelo matemático ideal, elaborado por Watts y Strogatz, pese a ser una buena metáfora no puede dar explicación clara de los hechos reales donde la conexión entre las personas, las neuronas o las páginas electrónicas no parten de una red regular ni simétrica. Subsecuentes investigaciones permitieron establecer que las redes complejas reales son, en palabras de Barabási: enormemente heterogéneas (2000, p. 45), donde la gran mayoría de los elementos o nodos están apenas conectados, al tiempo que unos pocos nodos están profmente conectados. Y esta composición estructural es una característica que a su vez hace surgir otras más que confieren complejidad a muchas redes reales.

Los efectos de esta arquitectura en un sistema son sorprendentemente congruentes con la teoría del caos: pequeños cambios que pueden tener grandes consecuencias, mientras que en las redes complejas el efecto del mundo pequeño determina que los cambios en un nodo de la red pueden afectar a todo el sistema y hacerlo con rapidez. La propagación de un virus y el rápido acceso a información útil son dos caras de la misma moneda. La clave de esta eficiencia se encuentra en la estructura de la red compleja, en su arquitectura que está lejos de ser una red enmarañada sin orden ni concierto.

## Rich gets richer

En el año 2000, Laszlo Barabási y Reka Albert, tras estudiar esas propiedades de orden-desorden de las redes complejas, establecieron que el crecimiento de una red compleja se basa en un efecto o dinámica donde “el

rico se hace más rico”, exactamente como ocurre con la concentración de la riqueza en una economía de libre mercado (Lara Rosano, 2011).

Ese efecto ya había sido descrito antes como una ley de potencia por numerosos matemáticos y físicos entre los cuales destaca Charles Soret (1854–1904) y su explicación en una red es relativamente sencilla: si un nodo o elemento posee más número de conexiones que otro, será más popular o “atractivo”, pues atrae más la atención o la respuesta espontánea de conexión por parte de agentes aislados o en proceso de conectarse a la red, se da entonces un proceso de amplificación que hace más ricos a los ricos y más pobres a los pobres (porque la riqueza se concentra más en unos cuantos nodos o elementos).

Dicho efecto, que determina que el nodo o elemento que tenga más conexiones tiende “naturalmente” a enriquecerse y ganar numerosas interacciones con otros muchos elementos o agentes, convirtiéndose rápidamente en conexiones densamente visitadas llamadas *hubs*, un proceso de interconexión que genera redes denominadas *libres de escala*, donde los elementos o vértices cambian con el tiempo, de esas redes encontramos ejemplos diversos en la naturaleza y en la sociedad, no limitados a la descripción que originalmente hicieron Albert y Barabási de la web, como las relacionadas a continuación.

- La red de contactos sexuales entre personas. Pocas personas que tienen muchas parejas a lo largo de su vida, mientras que la mayoría de las personas tiene unas pocas parejas.
- La red de distribución eléctrica. Estaciones enormes que abastecen a vastas áreas, y al mismo tiempo una miríada de transformadores pequeños.
- La red de amistades entre personas. Unos muy populares y otros casi aislados. También se puede extender a las redes de llamadas telefónicas y de correo electrónico.
- Las redes de comercio internacional. Los países desarrollados, que son minoría, concentran la mayor cantidad de intercambio de bienes, mientras que en los países no desarrollados, que son la mayoría, el intercambio comercial es relativamente bajo. Se aplica también a las redes de comercio entre empresas dentro de cada país.

*Algunas definiciones en redes*

<p>Grado de distribución</p>	<p>Es el grado de conexiones que tiene un vértice o nodo en una red, representado por el número de aristas incidentes o conectadas a él. En redes muy grandes se calcula que puede haber un límite de conexiones que puede tener un vértice.</p>
<p>Flexibilidad de la red (<i>resiliencia</i>)</p>	<p>Relacionada con el grado de distribución, es la resistencia de las redes a la eliminación de sus vértices o nodos. Las redes varían en su nivel de resistencia a la eliminación de vértices.</p>
<p>Patrones de mezcla</p>	<p>Indica que hay por lo menos tres tipos generales de vértices distintos en una red y por lo tanto la naturaleza de las conexiones que pueden establecer varía. En <i>internet</i> se han identificado tres tipos generales de vértices: los de alta conectividad: los que generan contenidos y proveen caminos por recorrer; los consumidores o usuarios finales, y los vértices que cumplen ambas funciones. Una suerte de vinculación selectiva o cómo participa un actor en la red</p>
<p>Correlaciones de grado</p>	<p>El análisis de la vinculación selectiva entre los nodos o vértices más profimente conectados con otros en similar circunstancia; o si optan por conectarse con vértices con pobres conexiones. Ambas condiciones se han observado en las redes complejas y tienen efectos distintos en la estructuración y desarrollo de una red.</p>
<p>Estructura de comunidad</p>	<p>Son redes que muestran una estratificación en sus subredes, como resultado de vinculación selectiva que agrupa a vértices similares con los de su misma especie; una suerte de asociación por grupos, o agrupación de vértices “más” similares dentro de una misma red. Las redes de amistad por edad, preferencia sexual, gustos deportivos, etc.</p>

<p>Red de navegación</p>	<p>Además del efecto del mundo pequeño, la navegación implica que los vértices tienen facilidad para “buscar” y conectarse con sus similares, y pueden desarrollar patrones específicos de construcción de redes.</p>
<p>Tamaño de componentes</p>	<p>Se pueden considerar como una manera de cuantificar la eficiencia de una red a partir de los componentes gigantes, considerados como estructura modélica para comprender la totalidad y eficiencia de una red más grande.</p>

- Las redes de “citaciones” bibliográficas incluyen unos pocos libros o escritos muy citados, mientras que la mayoría de los libros reciben pocas o incluso ninguna mención.
- Las redes de neuronas en los organismos con sistema nerviosos. Hay *hubs* que concentran la mayor actividad neuronal, mientras que muchas neuronas tienen muy poca actividad.
- Las redes de interacción de proteínas en el metabolismo celular. Pocas proteínas que aparecen en la mayoría de las reacciones, mientras que la mayoría de las proteínas aparecen sólo en situaciones muy específicas.
- Las redes de caminos. La mayoría de los caminos llegan a unas pocas ciudades muy grandes, mientras que de la mayoría de ciudades pequeñas salen pocos caminos. El ejemplo vale para las rutas marítimas y los puertos, las rutas aéreas y las terminales aéreas (Wikipedia, consulta el 22 de enero de 13.)

## Propiedades universales de las redes

Durante décadas, hemos supuesto tácitamente que los componentes de sistemas tan complejos como la célula, la sociedad, o de Internet están conectados entre sí al azar. En la última década, una avalancha de investigaciones han demostrado que muchas redes reales, independientemente de su edad, la función y el alcance, convergen en arquitecturas similares, una universalidad que permite investigaciones de diferentes disciplinas para abrazar la teoría de redes como un paradigma común. El descubrimiento, la década pasada, de redes libres de escala fue uno de los acontecimientos que ayudaron a catalizar las redes de trabajo en la Ciencia hacia un nuevo campo de

investigación constituido por un conjunto diferente de retos y logros (Barabási, 2009, p. 46).

De acuerdo con la cita anterior, la noción de universalidad aplicada a las redes complejas, permite ir a la Teoría de las Redes Complejas como un instrumento metodológico útil para vincular los conocimientos de distintas áreas, pero también para afrontar problemas desde puntos de vista transdisciplinarios.

Los ejemplos anteriores de redes libres de escala dan buena muestra de esto y han sido profusamente investigados a la luz de los aportes de Strogatz, Albert, Erdős y Barabási, entre otros; o han actualizado conceptos investigados previamente y que han permitido descubrir, gradualmente, nuevas propiedades de las redes complejas. Una síntesis muy afortunada de tales propiedades, es la que nos ofrece Newman (2003, pp. 9-20), enriquecida con aportes y precisiones de Lara Rosano (2011) y Melanie Mitchell (2009).

A estas características universales de las redes complejas deben añadirse la fractalidad y el componente teleológico. Porque si se definen las redes sociales como un grupo o grupos de personas con un patrón de contactos o interacciones entre ellos, entonces el valor del enfoque de las redes sociales radica en su perspectiva relacional (y las relaciones humanas, como veremos, siempre están referidas a valores u objetivos), y en su poder analítico para medir y especificar propiedades de la estructura social. Como señala Faust (2001, p. 45), es posible poner a prueba hipótesis estructurales si conocemos el entramado íntimo de las relaciones sociales.

## GLOSARIO

SILVIA IRENE ALMANZA MARQUEZ

**Atractor:** De acuerdo con Weisstein un *atractor* es un conjunto de estados (puntos en el espacio de la fase), invariante bajo la dinámica, hacia el cual los estados vecinos en una cuenca dada de atracción asintótica se aproximan en el curso de la evolución dinámica. Un atractor se define como la unidad más pequeña que no se puede descomponer en dos o más atractores con distintas cuencas de atracción. Esta restricción es necesaria ya que un sistema dinámico puede tener atractores múltiples, cada uno con su propia cuenca de atracción.

Dicho de otra forma, el *atractor* es un punto de atracción dentro de una función de transformación hacia el cual se mueve una variable. Los sistemas están sometidos a un conjunto de *fuerzas conductoras* debido a las cuales se está moviendo cada variable, lo que a su vez conduce a su evolución en el tiempo, de acuerdo a los dictados de la dinámica del sistema, los sistemas dinámicos al evolucionar en función de ciertas fuerzas conductoras tienden a ser *disipativos*. De otro modo, cesaría el movimiento.

La *disipación y la fuerza conductora* tienden a combinarse en lo que se conoce como espacio de fase, para alejarse de las condiciones iniciales, transitorias, hasta llegar a un momento en que se establece el sistema en su comportamiento típico, como un sistema más evolucionado (es decir, en una nueva *fase de estado*). De aquí que las *transiciones de fase* sean inherentes a los sistemas adaptables complejos.

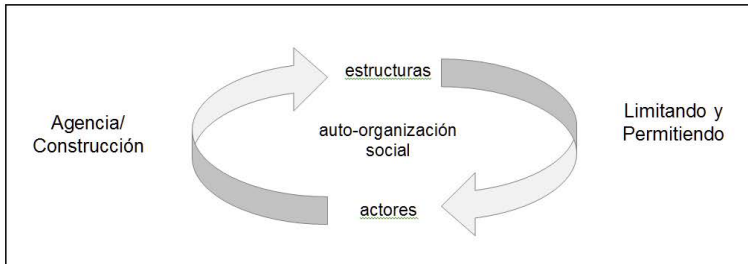
**Autoorganización:** Este concepto, acuñado en la ciencia moderna por Ashby en 1947, fue introducido en la cibernética por varios autores como von Foerster, Pask y Wiener en 1961, hasta volverse un concepto asociado, primero, con la teoría general de sistemas, y progresivamente difundido en el campo de sistemas complejos, sobre todo después de Prigogine en 1977.

La autoorganización significa que emergen patrones y regularidad sin ninguna intervención de un controlador central (Anderson, 1999). La autoorganización se define como *un proceso espontáneo de organización* (no gobernado por ningún sistema o autoridad externa). En este proceso, un todo organizado es creado espontáneamente fuera de la colección desordenada de partes interactuantes. En el contexto social, debe tomarse en cuenta que la autoorganización es un concepto diferente de empoderamiento o de autogestión. La autoorganización a menudo requiere empoderamiento, pero no son la misma cosa. El empoderamiento significa otorgar o delegar poder o autoridad a alguien. La autogestión se re-

fiere más al desarrollo de destrezas y capacidades personales y a su manera personal de actuar (Heyligen, 1989).

La autoorganización es un concepto central vinculado con la calidad circular, entre la acción humana y la estructura social (Fuchs, 2004 (véase la figura 1). A menudo es desencadenado por fluctuaciones aleatorias que son amplificadas por bucles de retroalimentación positiva.

FIGURA 1. Autoorganización social



FUENTE: Christian Fuchs, "Knowledge Management In Self-Organizing Social Systems", *Journal of Knowledge Management Practice*, Mayo, 2004.

La organización resultante es totalmente descentralizada o distribuida sobre todos los componentes del sistema. Como tal, es típicamente muy robusta y capaz de sobrevivir y autoreparar daño o perturbaciones substanciales. Esto está asociado con el concepto de *resiliencia*. La autoorganización ocurre en una variedad de sistemas físicos, químicos, biológicos, sociales y cognitivos. Se trata de un proceso donde alguna forma de orden global o coordinación surge de las interacciones locales entre los componentes de un sistema inicialmente desordenado. Este proceso es espontáneo: no es dirigido o controlado por ningún agente o subsistema dentro o fuera del sistema; sin embargo, las leyes seguidas por el proceso y sus condiciones iniciales pueden ser elegidas o dadas por un agente (un detonante o facilitador).

La autoorganización puede ser detectada en un sistema que tiene partes, interacciones, relaciones estructurales, comportamiento, estado y un límite que lo delimita de su ambiente. Los sistemas auto-organizados son sistemas complejos y abiertos. Son abiertos en el sentido de que ellos importan energía, por ejemplo, información que es transformada dentro del sistema, y como resultado se exporta energía (Fuchs, 2004). Una relación cercana entre autoorganización y sistemas complejos puede verse también en Clippinger (1999).



Holland (1995) distingue cuatro propiedades y tres mecanismos que son comunes a todos los sistemas auto-organizados. Las propiedades son: *agregación, no-linealidad, flujos y diversidad*. Los mecanismos son: *etiquetado, modelos internos y construcción de bloques*.

**Autopoiesis:** Un sistema autopoietico es definido como una red de componentes interrelacionados produciendo procesos, por ejemplo: los componentes en interacción generan la misma red que los produjo a ellos (Maturana y Varela, 1974). El sociólogo alemán Niklas Luhmann (1997) elaboró una *teoría de la transferencia*, y definió a los sistemas sociales como consistentes de comunicaciones que van constituyendo redes autopoieticas, más que de individuos, roles o acciones.

Los sistemas autopoieticos, según Luhmann (1997), son producto de una reflexión interdisciplinaria sobre los desarrollos exitosos de otras disciplinas. La aplicación del concepto de autopoiesis a los sistemas sociales implica que el carácter *autorreferencial* de estos sistemas no se restringe al plano de sus estructuras, sino que incluyen sus elementos y sus componentes. Es decir, que él mismo construye los elementos de los que consiste. La intención de Luhmann es buscar equivalentes funcionales a la integración normativa para dar solución al problema que afecta la autoorganización y la autoproducción de las sociedades en contextos de contingencia y riesgo. En ese sentido introduce el nuevo paradigma autopoietico constituido en torno a la distinción entre sistema y entorno como condición de posibilidad para el sostenimiento del límite, el cual permite las operaciones autorreferenciales.

### **Autoreferencia.**

**Significado simple**, neutral, implica que el cambio en el estado del sistema en un momento dado sigue de su estado en el momento previo; **biológico**, requiere sentidos y una memoria, un sistema contiene información y conocimiento sobre sí mismo, por ejemplo sobre su propio estado, estructura y procesos; de calidad circular, significa que un individuo o sistema social exhibe auto-observación, autoreflexión y un grado de libertad de acción. Así, puede coleccionar información sobre su propio funcionamiento lo cual, a su vez, puede influenciar dicho funcionamiento (afecta y es afectado). Siendo un concepto derivado de la cibernética de primer orden, la calidad circular está presente en todas las formas de autoreferencia. La acumulación de conocimiento conduce a la utilización de ese conocimiento; la utilización del conocimiento tanto por los investigadores como por sus objetos de investigación puede invalidar ese conocimiento y generar otro nuevo (Geyer, 1994).

3 Puesto que los seres y grupos humanos son en buena medida autocontrolables, los esfuerzos jerárquicos de arriba-hacia-abajo suelen fallar. De ahí que los científicos sociales orientados por el enfoque cibernético, estén llegando a la conclusión de que el conocimiento útil no debe aplicarse para controlar o prescribir el comportamiento de los sistemas sociales o individuales, sino a tratar de mejorar la competencia de los actores a nivel de sus raíces para controlarse a sí mismos. El control en sentido cibernético no implica necesariamente jerarquía sino dirección (Geyer, 1994).

**Borde del caos:** es un concepto no muy bien definido, acuñado por Christopher Langton en 1990. Suele usarse como una metáfora para referirse a esa región de más alta complejidad y más baja estabilidad, en la que operan los sistemas biológicos, físicos, económicos y sociales, entre orden y desorden, estabilidad e inestabilidad, regularidad/irregularidad, organización y caos. Es decir, marca el límite entre orden y caos. Describe, en general, un punto de transición en el comportamiento del sistema, por un lado es estable y por el otro, inestable. Se dice que el borde del caos es el punto donde ocurren las cosas más interesantes, incluida la innovación. El borde del caos puede explicarse como un *punto crítico auto-organizado* (o criticalidad auto-organizada), o *transición de fase* (Lara Rosano, 2014) es un punto de alta complejidad porque combina estabilidad e inestabilidad: el sistema evoluciona auto-organizadamente hacia un cierto estado (el cual incrementa estabilidad, certidumbre y previsibilidad), hasta que llega el momento en que en estos estados se incrementa la inestabilidad, la incertidumbre y la imprevisibilidad, para este momento *el punto crítico* es entonces un estado “meta-estable” y complejo, caracterizado por inestabilidad en estabilidad, incertidumbre en certidumbre, o impredecible en predecible, por ejemplo, la *destrucción creativa* de Schumpeter (1934).

**Transición de fase:** Aquí *el borde del caos* es el punto general de complejidad más alta entre el orden y el desorden, o regularidad y caos. Define una pequeña región con la complejidad más alta entre el orden (estabilidad, no cambio o cambio periódico, estructuras fijas o rígidas, demasiado estáticas) y caos (inestabilidad, cambio constante o aperiódico; no hay estructuras rígidas o fijas, demasiado ruidosas). La evolución en este punto, al borde del caos, produce naturalmente las estructuras más complejas en sistemas adaptables, porque la complejidad en el ambiente alcanza aquí su pico. Los sistemas complejos funcionan al borde del caos.

En los sistemas adaptables, a medida que se avanza de la fase ordenada, unificada a la fase desordenada, diversa, caótica, se alcanza un *punto*

*de transición de fase* compleja entre la unidad y la diversidad, que puede ser caracterizada como unidad en diversidad (y viceversa). En cuadro 1 se sintetizan las diferencias entre *punto crítico* y *transiciones de fase*.

**Bifurcación y sistemas disipativos:** Las relaciones no lineales ocurren en sistemas que están lejos del equilibrio, donde relativamente pocas entra-

CUADRO 1. Diferencias entre punto crítico y transiciones de fase

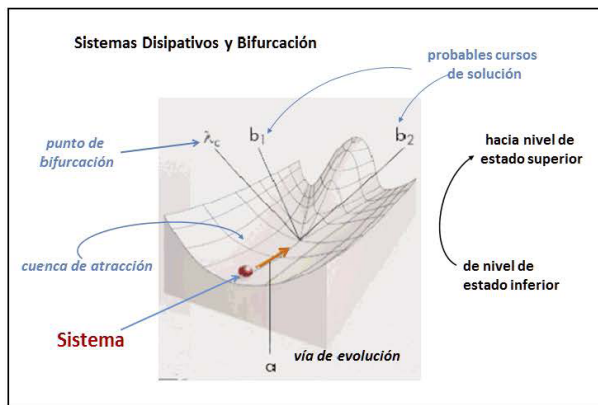
	Punto crítico (criticalidad autoorganizada)	Transiciones de fase
	Describe un punto y un estado en el que evoluciona el sistema, donde todo el sistema está evolucionando hacia el borde del caos	Describe un punto y lugar en un ambiente donde otros sistemas pueden evolucionar, donde los sistemas están evolucionando en el borde del caos
Tienen en común	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El comportamiento del sistema puede cambiar abruptamente en el punto crítico</li> <li>• Es el punto de más alta complejidad: ni siquiera un sistema diverso extremadamente desordenado, ni un sistema unificado extremadamente ordenado. La complejidad alcanza su pico entre el orden y el desorden: como inestabilidad dentro de la estabilidad y, en general, como diversidad dentro de la unidad.</li> <li>• Balance delicado entre dos fuerzas opuestas complementarios y, en general, como diversidad dentro de la unidad.</li> <li>• Balance delicado entre dos fuerzas opuestas complementarios, por ejemplo, una fuerza organizadora y reguladora, y una aleatoria o caótica; o una fuerza que expansiva y otra contractiva; o una fuerza atrayente y una repulsiva.</li> <li>• Sistema cerca de un punto con dependencia sensible a las condiciones iniciales (v ejemplo animado en <a href="http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/45/double-compound-pendulum.gif">http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/45/double-compound-pendulum.gif</a>).</li> <li>• Un pequeño paso sobre el borde puede tener un efecto grande y dramático (efecto mariposa) o casi ningún efecto.</li> <li>• El comportamiento macroscópico de tal sistema puede cambiar dramáticamente como resultado de pequeños cambios en las condiciones microscópicas.</li> </ul>	

FUENTE: elaboración propia basada en <http://wiki.cas-group.net/index.php?title=edge>

das (detonantes) pueden provocar consecuencias masivas. Son estos “momentos revolucionarios”, influidos por el azar —o por la inducción de ciertos detonantes—, que van marcando *puntos de bifurcación* en donde la dirección del cambio no se puede predecir con certeza: se puede ir hacia la desintegración dentro del caos, o hacia un salto “espontáneo” hacia un nivel superior de orden u organización, llamada por Prigogine “estructura disipativa”, porque requiere más energía para sostenerse comparada con la estructura más simple que reemplaza. Esta idea se muestra en la figura 2.

Las sociedades cambiantes actuales, según esta teoría, están, generalmente, en una situación lejana del equilibrio: son sistemas abiertos, comple-

FIGURA 2. Adquisición de complejidad como resultado de la bifurcación



jos, altamente dinámicos e interactivos, cambiando a tasas aceleradas.

**Sistemas disipativos:** Desde el campo de la química, Prigogine (1977) descubrió que ciertas reacciones químicas no ocurren como cadenas causales mecanicistas, lineales, según el modelo de Newton, en cambio descubre que a partir de ciertas reacciones caóticas, de no equilibrio, se puede romper temporalmente la simetría en el espacio y formar nuevas estructuras ordenadas de otra forma. A este fenómeno de calidad circular, orgánica, le llamó estructuras o sistemas disipativos. La novedad que aporta Prigogine es que *lejos del equilibrio* la materia adquiere propiedades que son completamente nuevas. El nivel de estado “A” del sistema, mediante diversos procesos (factores interactuantes) de retroalimentación que se van interconectando, con el tiempo se van alejando del equilibrio al sistema hasta un punto de bifurcación, provocando “la disipación” de dicho nivel de estado, para pasar a un nivel de estado superior “B” (véase la figura 2).

El concepto de *estructura disipativa* encuadra las propiedades que caracterizan los sistemas sometidos a condiciones de no-equilibrio:

- sensibilidad
- flexibilidad
- movimientos coherentes de gran alcance
- posibilidad de estados múltiples
- historicidad de las elecciones adoptadas por los sistemas

En el *no-equilibrio* hay una *no linealidad* de los comportamientos —de la materia, del sistema—. El no equilibrio, sin embargo, no es sinónimo de desorden. Es otra forma de orden que se expresa en nuevos estados, una riqueza de comportamientos y multiplicidad que no es posible hallar en el equilibrio, porque se introduce el elemento de la historicidad del tiempo (Prigogine, 1977). Desde esta perspectiva, el equilibrio es sinónimo de muerte, ya no existen fluctuaciones. Al ya no cambiar de estado, deja de tener historia. De aquí la importancia de entender las fluctuaciones de todo sistema dinámico, y de que todos los sistemas sociales son dinámicos, e irreversibles.

Para Prigogine (1977), es la función la que crea la estructura. Las estructuras alejadas del equilibrio, en un sentido evolutivo, están condicionadas por la *irreversibilidad*, la *probabilidad* y la *coherencia*. En el determinismo lineal se piensa que si se conocieran todas las condiciones iniciales con exactitud, se podría determinar el resultado también con exactitud. Aquí, el cálculo de probabilidades se asocia a situaciones idealizadas, no representativas de la realidad. Con Prigogine, en cambio, los conceptos de *probabilidad e irreversibilidad* se introducen para analizar la dinámica creativa, co-evolutiva de los fenómenos de las *estructuras disipativas* del *no equilibrio*, independientemente de la información que se posea.

Finalmente, hay que decir que la retroalimentación se expresa como *bucles de retroalimentación*, la cual puede ser *positiva* (amplificadora de la desviación) y *negativa* (reducción de la desviación) (véase explicación en bucles de retroalimentación).

**Emergencia:** La idea de emergencia se refiere al entendimiento de cómo los detalles sobre las partes, por ejemplo, los árboles, se relacionan con el comportamiento del sistema como un todo (el bosque). Alude a una interdependencia la cual se refiere al efecto de los cambios en una parte del sistema sobre las otras partes del sistema (Bar-Yam, 2000). También es la forma como surgen los *patrones* y sistemas complejos a partir de una multiplicidad de interacciones relativamente simples. La emergencia es

central para las teorías de niveles integradores y de sistemas complejos. Sus características centrales son: 1) novedad radical (rasgos no previamente observados en sistemas); 2) coherencia o correlación (significando totalidades integradas que se mantienen por sí mismas o durante algún periodo de tiempo); 3) un nivel macro, es decir, hay una propiedad de totalidad; 4) es el producto de un proceso dinámico (evoluciona); y 5) es ostensible, puede ser percibido.

La idea de *emergencia* describe los patrones de interacción que aparecen en el tiempo a través de los comportamientos interconectados de los actores que se están adaptando o/y construyendo su ambiente. A medida que emergen los patrones de interacción, el SAC como un todo se adapta al cambio que está teniendo lugar en el ambiente más grande (Morrison, 2002). La evolución ocurre, por ejemplo, a través de la solución de problemas, la experimentación, la comunicación y otros procesos interactivos (Chiles, Meyer y Hench, 2004;). Estas interacciones pueden tener lugar en segmentos localizados del sistema (por ejemplo, en líderes, que a su vez resultan en patrones más amplios de interacción (Anderson, 1972) La *emergencia*, por lo tanto, refleja la idea de que las interacciones locales derivan en patrones más grandes que son formados con el tiempo como resultado de un proceso adaptativo. Estos formarán una estructura identificable a medida que el sistema se adapta, por ejemplo, a la implementación de una política.

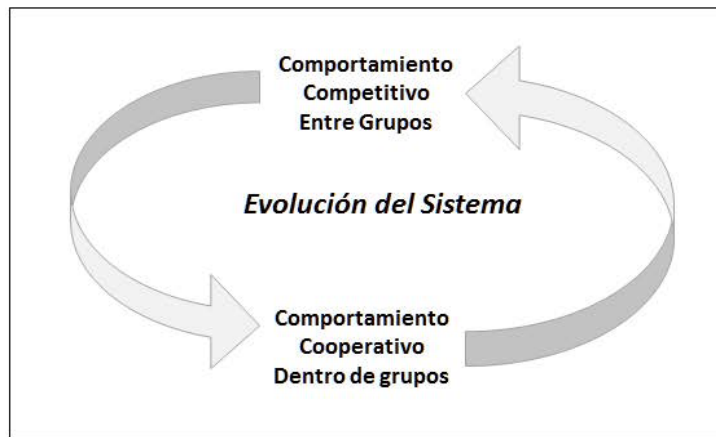
**Equilibrio:** Este concepto se refiere al movimiento de entrada y salida de estados estables e inestables a medida que evoluciona el sistema. Según evoluciona el sistema, se va moviendo a través de periodos de equilibrio conforme cambia, para regresar a un patrón estable de interacción, antes de cambiar de nuevo (Gould y Eldrige, 1977). Para que sean creadas nuevas estructuras y orden, el sistema debe moverse lejos de la condición de equilibrio, de otra forma los cambios serán sólo temporales (Mischen y Jackson, 2008; Mitleton-Kelly & Land, 2003). Según el enfoque de SAC, el movimiento entre el cambio y la estabilidad de un sistema sigue un patrón, y esos patrones pueden ser entendidos a nivel local de la interacción (Fernández, 2007). Aunque los patrones de relaciones o autoorganización puedan verse desordenados, estas interacciones son, de hecho, regidas por una serie de “reglas” de compromiso social subyacentes, similares a los patrones de comportamiento auto-organizado de una parvada de aves, movimientos sociales, etc. (Stacey, 2001).

**Evolución:** Se refiere a pequeños cambios incrementales que pueden ser una manera efectiva para crear sistemas complejos. Para entenderla hay que reconocer los papeles complementarios entre la *competencia* y la *coo-*

*peración*. Una parte esencial de la evolución es la formación de grupos interdependientes y comportamientos colectivos, cooperativos. La competencia entre equipos resulta de la cooperación dentro de equipos; y la cooperación dentro de los equipos es necesaria para la competición entre equipos. Esto contribuye a explicar los procesos evolutivos y la conformación de sistemas complejos (Bar-Yam, 1997). (Véase la figura 3.)

**Fractal:** “Un fractal es un objeto geométrico desigual o irregular en todas sus escalas; es decir, que puede ser dividido en partes, cada una de las cuales es similar al objeto original. Se dice que los fractales poseen detalle infinito,

FIGURA 3. Retroalimentación entre competición y cooperación en el proceso evolutivo y formación de sistemas complejos.



FUENTE: Nicolis, G. y Rouvas-Nicolis, “Complex Systems”, *Scholarpedia*, 2 (11), 2007. Disponible en [http://www.scholarpedia.org/article/Complex\\_systems](http://www.scholarpedia.org/article/Complex_systems)

y algunos de ellos, tienen una estructura auto-similar que ocurre a diferentes niveles de magnificación. En muchos casos, un fractal puede ser generado por un patrón repetitivo, en un proceso típicamente recursivo o iterativo. El término fractal fue acuñado por Benoît Mandelbrot (1975), proviene del latín *fractus*, “roto”. La geometría fractal es la rama de las matemáticas que estudia las propiedades y comportamiento de los fractales. Describe muchas situaciones que no pueden ser explicadas por la geometría clásica euclidiana. Actualmente el concepto es aplicado en muy diversos campos como la ciencia, la tecnología, el arte, etc.” (<http://en.wikipedia.org/wiki/Fractal>).



**Holismo:** En las ciencias sociales, especialmente en la sociología, el opuesto al enfoque holista sería el individualismo metodológico. Un enfoque sociológico holista considera y analiza el comportamiento de los individuos como una consecuencia de la matriz social en la que se hallan insertos. Mientras que el individualismo metodológico privilegia, en su análisis, la interpretación subjetiva de los hechos sociales.

Aunque ya existente en la teoría general de sistemas, el holismo está implícito en los enfoques de la cibernética. El holismo sostiene que los sistemas y sus propiedades deben ser analizados en su conjunto y no mediante las partes que los componen, consideradas estas separadamente. Esto es así porque el holismo considera que el “todo” es un sistema más complejo que una mera suma de sus elementos constituyentes. Su opuesto conceptual sería el reduccionismo científico, según el cual un sistema complejo puede ser explicado mediante una simple reducción del mismo a las partes que lo componen. Por ejemplo, los procesos biológicos son reducibles a la química, y las leyes de la química son explicadas por la física. Desde una perspectiva holista, por el contrario, los sistemas funcionan como conjuntos orgánicos y su funcionamiento no puede ser plenamente comprendido si sólo se tienen en cuenta sus partes componentes. (von Bertalanffy, 1968)

CUADRO 2. linealidad y no-linealidad

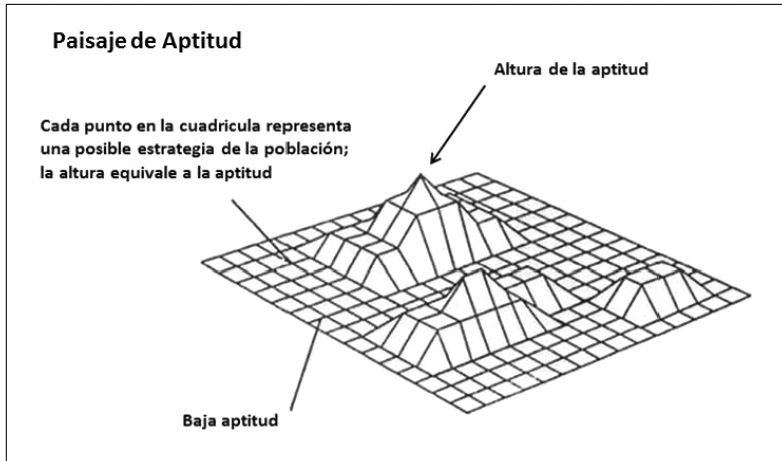
Relación lineal	Relación no lineal
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Los cambios en la entrada del sistema resultan en cambios proporcionales en la salida del sistema.</li> <li>• Aditividad: el todo es igual a la suma de sus partes.</li> <li>• Conocer las entradas conduce a conocer los productos.</li> <li>• Los problemas se resuelven reduciéndolos a sus partes individuales y controlando su ensamblaje.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Los resultados de las acciones no pueden ser predecidas.</li> <li>• Los resultados pueden ser desproporcionados</li> <li>• Una entrada puede no tener efecto a menos que otra entrada o condición esté presente.</li> <li>• Las cadenas de consecuencias se extienden en el tiempo y en muchas áreas los efectos de la acción siempre son múltiples.</li> </ul>

FUENTE: Wilhelm, K. 1998

**Paisaje de aptitud:** Describe las adaptaciones y movimientos de los actores dentro de un sistema, en donde “el paisaje” representa el espacio posible de interacción (Kauffman, 1995). (Véase la figura A-I.4.)



FIGURA 4. Paisaje de aptitud



FUENTE: *Mobile Enterprise*, “Microsoft and The Edge Of Chaos”, disponible en <http://mobileenterprise.wikidot.com/microsoft-and-the-edge-of-chaos>

La aptitud del paisaje describe la conectividad entre los actores en un sistema y el grado en el cual son desarrolladas nuevas interacciones y recursos existentes (Stacey, 2001). Por analogía, se habla también de picos de aptitud: si el comportamiento de un grupo de gente adquiere nuevo conocimiento le permite trepar a picos particulares del paisaje, mejorará su desempeño y logrará una nueva o más amplia perspectiva del terreno (Byrne y Rogers, 1996) Por otro lado, si otros miembros del grupo eligen estrategias basadas en conocimiento existente y opiniones de otros miembros del mismo grupo, en comparación trepará picos bajos y redondeados (véase la figura 4). Ambos tipos de “picos” son importantes de considerar en la implementación, ya que es necesario tanto explorar nuevo conocimiento a través de interacciones desconocidas, así como explotar el conocimiento existente (Hansen, 1999).

En las decisiones de hacer interacciones entre las posibilidades del paisaje los actores suelen escoger permanecer en su “vecindario” (Morrison, 2002). Con el tiempo, los actores pueden elegir senderos familiares, muy recorridos entre picos, conduciendo así a un patrón de interacción implícitamente “institucionalizado” como rutina (Kim, *et al.*, 2006). En un sistema de investigación, por ejemplo industrial o de producción, los académicos tienden a comprometerse en interacciones con los de sus mismas disciplinas o áreas, o del mismo género. Elegir caminos muy andados, a su vez, crea una especie de *path dependence*. Las políticas que tengan la intención de abrir nuevas avenidas de desempeño superior pue-

den resultar en un mejoramiento mínimo si se limitan a estimular a actores que sólo elijan rutas familiares muy andadas (Daly y Finnigan, 2009; Kim *et al.*, 2006), en oposición a la formación de nuevas interacciones.

**Path Dependence:** Se refiere al proceso dependiente de las trayectorias pasadas, cuyo resultado evoluciona como consecuencia de la historia del propio sistema (Arthur, 1999). Desde el punto de vista evolucionario se le asocia con otros conceptos esenciales para explicar la adaptabilidad económica regional como son los bloqueos, la creación de nuevas trayectorias, variedad relacionada, coevolución, costos irrecuperables, ciclos de vida de *clusters*, región de aprendizaje y resiliencia (Hassink, 2010).

**Bloqueo:** son obstáculos que desgastan una región. Los bloqueos regionales pueden ser *a)* bloqueos funcionales; *b)* bloqueos cognitivos y *c)* bloqueos políticos.

**Cluster:** han probado ser inadecuados para asegurar la sostenibilidad. No son suficientes para sostener las regiones en circunstancias cambiantes.

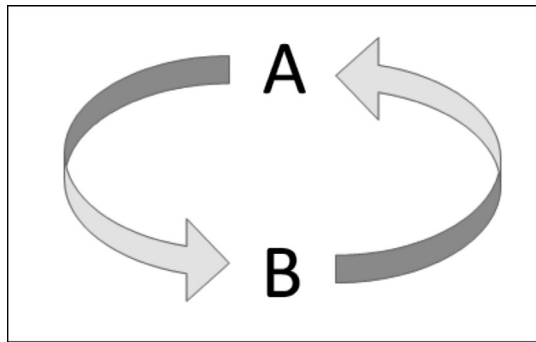
**La región de aprendizaje:** es el principal concepto desde la geografía económica evolucionaria. Las regiones de aprendizaje se basan en una estrategia regional de innovación donde un amplio conjunto de actores regionales relacionados con la innovación están fuerte y flexiblemente conectados unos con otros bajo un conjunto de principios de política.

**Patrones autoorganizados:** Los patrones auto-organizados de comportamiento surgen de las interacciones entre las partes de un sistema. Muchos patrones de comportamiento social surgen de procesos formadores de patrones. Por ejemplo, pueden ser dos modelos simples de influencias entre la gente para entender fenómenos aparentemente misteriosos como las modas y pánicos. Las interacciones más elaboradas crean cliques (Bar-Yam, 1997). Los patrones pueden emerger de las redes de elementos interactuantes. Los modelos de influencias en redes pueden ser dos para estudiar patrones de comportamiento social altamente complejos. Las redes sociales pueden revelar cómo la gente puede ser arreglada para promover creatividad a nivel de organizaciones (Bar-Yam, 1997).

**Retroalimentación:** La retroalimentación es un proceso circular de influencia donde la acción tiene efecto sobre el actor (véase la figura 5). Tradicionalmente, uno tiende a pensar en forma lineal más que circular, en la calidad de una sola vía, según la creencia de que hay un punto de inicio

y uno terminal. Por ejemplo, los estímulos generan respuestas, los fines determinan los medios, etc., asumiendo que las relaciones simplemente pueden ir en la dirección opuesta o que son recíprocas. Precisamente una de las inquietudes de la sociocibernética es estudiar cómo cambian los sistemas y desarrollar metodologías para analizar esta clase de mutua calidad o calidad circular, y cómo se transforman los sistemas por sí mismos. Ello implica cambiar la forma de pensar el cambio, pasar de lo lineal a lo circular —pensar en *bucles de retroalimentación*, en donde A ca B, y B ca A—, en lugar de pensarlo como un proceso de una sola vía, donde A ca B (Maruyama, 1963).

FIGURA 5. Retroalimentación



**Bucle de Retroalimentación:** es un mecanismo de control de los sistemas dinámicos. Se trata de un tipo de lazo circular que hace que el sistema se realimente, es decir, que la salida vuelve al principio. Se trata de un proceso cuya señal se mueve dentro de un sistema, y ella misma vuelve al principio de éste, como en un bucle. Este bucle se llama *bucle de retroalimentación*. La retroalimentación y la autorregulación están íntimamente relacionadas. A medida que un sistema evoluciona y se adapta, genera bucles de retroalimentación o procesos de señalización de información que ayudan a crear direcciones de patrones de interacciones y proporcionan oportunidades para que el sistema aprenda y se adapte a las demandas ambientales (Stacey, 2001). Para que un sistema cambie y se adapte a su ambiente debe ocurrir la retroalimentación entre los elementos interactuantes del sistema (Morrison, 2002). Los sistemas requieren retroalimentación para ser funcionales en lo que se conoce como *al borde del caos*. Este es el punto en el cual el sistema está lejos del equilibrio y en un estado inestable que mueve hacia adelante (Stacey, 2001). Operar al bor-

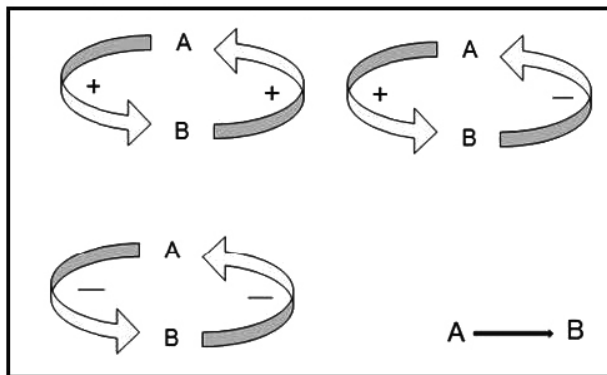
de del caos abre oportunidades al inyectar novedad a las operaciones normales (Stacey, 2001).

**La retroalimentación como proceso de intercambio de información:**

La retroalimentación está a menudo distribuida a través de un sistema de interconexiones como una manera de incrementar el conocimiento, el significado compartido y finalmente de mejorar el desempeño mediante el aprendizaje (Morrison, 2002). La retroalimentación es una parte importante del manejo de conocimiento. El conocimiento, especialmente el conocimiento en sistemas de alto desempeño, frecuentemente está distribuido a lo largo de múltiples actores, a través del sistema (Spillane, 2006). Como la retroalimentación en los SAC es un importante señalador de información y un proceso de aprendizaje que ayuda a crear y direccionar los patrones de interacción, y a maximizar la dispersión de recursos a través del sistema, es deseable buscar retroalimentación (intervención sobre recursos relacionales tales como conocimiento, asesoría, etc.) de aquellos que ya han recibido retroalimentación (recursos).

Maruyama (1963) examinó cómo la retroalimentación puede producir más que simples ajustes y, en lugar de ello, producir nuevas formas y estructura. Para ello desarrolló una metodología muy útil para el estudio de la dinámica de sistemas complejos, enfocada en bucles de retroalimentación positiva o negativa (figura 6).

FIGURA 6. Bucles de retroalimentación positiva y negativa



**Retroalimentación negativa:** es la más común, ayuda a mantener estabilidad en un sistema a pesar de los cambios externos. Se relaciona con la homeostasis.

**Retroalimentación positiva:** una característica clave de la retroalimentación positiva es que pequeños disturbios se amplifican. Cuando ocurre un cambio en un sistema, la retroalimentación positiva ca un cambio mayor en la misma dirección, por ejemplo en sociología es el efecto red: cuando más personas son alentadas a participar en una red, se incrementa el alcance de la red; mientras más se expande la red, más personas se incorporarán; la limitante para la retroalimentación será, por supuesto, el tamaño de la población. Es decir, amplifica las posibilidades creativas (evolución, cambio de metas); es la condición necesaria para incrementar los cambios, la evolución o el crecimiento. Da al sistema la capacidad de tener acceso a nuevos puntos del equilibrio (o sea, transitar hacia nuevas fases de estado) con el fin de salir rápidamente del estado inicial. La retroalimentación puede ser directa, cuando una *variable de estado* de un sistema tiene un bucle de retroalimentación que está influyendo sobre su propia tasa de cambio; o indirecta, a través de otras *variables de estado*. Por lo tanto, el predominio de signos positivos o negativos en los bucles del sistema tiene una gran influencia sobre el comportamiento global resultante.

**Autocatálisis y catálisis cruzada:** es un tipo de *retroalimentación positiva*. Brian Arthur (1990) ha aplicado a la economía el concepto de retroalimentación positiva como procesos autocatalíticos los cuales inducen su propia evolución a medida que se hacen más complejos en el tiempo. La catálisis cruzada es cuando dos diferentes grupos catalizan la síntesis de uno y otro. A su vez, Lara-Rosano (2016 b) sintetiza la idea de que la auto-catálisis es un proceso (de retroalimentación positiva) de conformación de redes autocatalíticas, que son la fuente de la autoorganización. Hay catalizadores físicos y catalizadores simbólicos. Los catalizadores sociales son catalizadores simbólicos: ideas, conceptos, creencias, ideologías, emociones, rumores. Surgen de la necesidad egoísta de varios integrantes. Pueden inducir la colaboración y la cooperación (Lara-Rosano, 2016 b).

**Resiliencia:** *a)* Es un proceso que se refiere a la capacidad biológica para adaptarse, recuperarse y prosperar bajo condiciones ambientales adversas por la adquisición de nuevas herramientas; *b)* en sistemas tecnológicos resiliencia se refiere a la capacidad de un sistema de soportar y recuperarse ante desastres y perturbaciones; *c)* en términos de ciencias sociales es la adaptación regional, por lo que tiene cercanas conexiones con la economía evolucionista y la geografía económica evolucionista. En términos de economía, la resiliencia es el retorno a un equilibrio fijado, estrechamente definido o de múltiples equilibrios. Desde la perspectiva de la geografía económica evolucionaria, Clark *et al.* (2010) descri-

ben la resiliencia como un complejo de capacidades tecnológicas, *path dependences* y factores institucionales incluyendo coordinación y rutinas de control. La política de desarrollo económico regional, por ejemplo, tiene una directa relación con la *path dependence*; *d*) en sociología, es la capacidad que tienen los grupos sociales para sobreponerse a los resultados adversos; reconstruyendo sus vínculos internos a fin de hacer prevalecer su homeostasis colectiva de tal forma que no fracase en su propia sinergia. En el ámbito regional, una región resiliente es una donde los mercados y las estructuras políticas locales continuamente se adaptan a las condiciones cambiantes del ambiente; sólo cuando estos procesos fallan, el sistema es forzado a alterar las grandes estructuras (Hassink, 2010). Este autor encuentra que la resiliencia es el primer punto en la serie de tiempos relacionados a un momento de transición o cambio, normalmente debido a un choque exógeno. Hay una relación entre la habilidad para reaccionar en el corto plazo a choques exógenos y las transiciones de largo plazo en el mercado. Christopherson *et al.* (2010) señalan que el proceso de resiliencia regional abarca repercusión, adaptación y recuperación. La resiliencia regional está vinculada a cómo tratar tiempo, espacio y proceso. La idea del espacio es construida vía la acción humana y las relaciones sociales. Las regiones son manifestación de esas acciones y están en constante proceso de transición. Las estrategias más efectivas para la resiliencia regional se apoyan en los niveles adquiridos de capital cívico y la dotación existente de instituciones regionales para trazar nuevas vías hacia adelante. La resiliencia regional tiene una cercana relación con la capacidad innovadora y la geoeconomía. Resalta la importancia de las capacidades regionales arraigadas y el papel de las inversiones de política con el fin de mitigar el deterioro progresivo.

**Modelación y simulación computacional:** con la disponibilidad creciente de tecnologías de la computación de alta velocidad y la informática, los problemas cada vez más complejos pueden ser modelados y simulados con gran realismo. Estas son herramientas basadas en las ciencias de la computación, —proviene de la cibernética de primer orden—, que está haciendo importantes incursiones en las ciencias sociales para conformar lo que se conoce como sociomática. La simulación permite incorporar un creciente número de variables interactuantes en un modelo; es como un laboratorio de investigación, tiene la gran ventaja de poder investigar y experimentar para ver y entender mejor los posibles efectos al cambiar algunas de las variables sin afectar la realidad. También la simulación con modelos complejos le permite a uno descubrir las consecuen-

cias latentes de ciertas acciones pretendidas y pronosticar la emergencia y efectos de comportamientos no previstos (Lara-Rosano, 1990 pp., 79-84).

**Sistema:** conjunto de elementos que interaccionan entre sí y con el entorno, una especie de campo en el que se desarrolla su actividad con grados variables de complejidad. Sistema y entorno fluyen acoplándose recíprocamente (Lara-Rosano, 1990).

**Sistema social humano:** está compuesto de un conjunto de agentes sociales humanos (individuos, grupos, organizaciones formales) y sus relaciones entre ellos para constituir alguna forma de interacción social (Byrne, 2009 Holland, 1995 Klir, 2001; Luhmann 1995)

**Subsistemas y suprasistemas:** el sistema siempre forma parte de un suprasistema y está constituido en su interior por subsistemas, integrados por sus partes componentes que están operando.

Desde una perspectiva dinámico-funcional, los subsistemas están conformados por procesos interconectados.

**Teleológico:** explicación en función de su fin. Rosenblueth, Wiener y Bigelow (1943) integraron el término a los sistemas cibernéticos. El concepto responde a una intencionalidad (fin), conscientemente explicitada del agente, articulada generalmente dentro de un sistema teleológico (fines últimos e intermedios) que constituyen su proyecto vital, lo que no descarta la aleatoriedad inherente a la realidad. Los sistemas teleológicos son sistemas propositivos, con visión de futuro. Los sistemas sociales son inherentemente teleológicos por ser producto de la intervención humana y social. Para explicar su funcionamiento, por lo tanto, es importante tomar en cuenta el conjunto de objetivos de los agentes situados en el presente de cara al futuro (Lara-Rosano, 2014 pp. 183-191). Desde esta perspectiva los sistemas sociales son, por definición, teleológicos: su funcionamiento es orientado a una finalidad u objetivo, programado por humanos.

**Variable de estado:** El estado de un sistema está caracterizado por un cierto número de parámetros llamados *variables de estado*. Estas son magnitudes medibles o no del mismo, tales como el volumen, la temperatura, la presión, la cantidad de materia, etc. Estas variables pueden ser de entrada: son las cantes de la evolución del sistema dinámico; o de salida: son las que interesa medir y analizar para controlar al sistema. Una variable de estado es precisamente la que representa el estado actual del

sistema, el cual, si es función del tiempo, varía en cada instante de tiempo (ya sea al comienzo, al final o durante un periodo de tiempo). Estas variables interaccionan con las variables exógenas y las endógenas del sistema, llamadas también factores o convertidores, de acuerdo con las relaciones funcionales dispuestas. El valor que tome durante un periodo particular de tiempo puede depender no sólo de una o más variables exógenas en determinado periodo precedente, sino además del valor de ciertas variables endógenas de periodos anteriores. Las variables de estado pueden tener o no sentido físico; pueden o no ser medibles; y finalmente, para un mismo sistema dinámico las variables de estado no son únicas; de hecho, se pueden definir infinitos conjuntos de variables que sirvan como variables de estado (Lara-Rosano, 2016 a, pp. 22-26)



## REFERENCIAS

- Ackoff, R. L. (1999), *Re-Creating the Corporation: A Design of Organizations for the 21st Century*, Reino Unido, Oxford, Oxford University Press.
- (1981), *Creating the Corporate Future, Planificación de la empresa del futuro*, Nueva York, Wiley.
- (1978), *The Art of Problem Solving*, Nueva York, Wiley.
- (1974), *Redesigning the Future, Rediseñando el futuro*, Nueva York, Wiley.
- (1971), “Towards a System of Systems Concepts”, *Management Science*, 17 (11), pp. 661-671.
- (1970), *A Concept of Corporate Planning, Un concepto de planeación de empresas*, Nueva York, Wiley.
- (1953), *The Design of Social Research*, Chicago, The University of Chicago Press.
- y F. E. Emery (1972), *On Purposeful Systems*, Chicago, Aldine Atherton.
- Vergara y J. Gharajedaghi (1983), *A Guide to Controlling your Corporation's Future, Guía para controlar el futuro de la empresa*, Nueva York, Wiley.
- Aldrich, H. E. (1979), *Organizations and environment*, Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall.
- Amaral, L. A. y otros (2000), *Classes of small-world networks*. Natl Acad Sci USA.
- Anderson, P. W. (1999), “The role of the manager in a self-organizing enterprise”, en John Clippinger (ed.), *The Biology of Business: Decoding the Natural Laws of Enterprise*, San Francisco, Jossey-Bass.
- (1972), “More is Different: Broken Symmetry and the Nature of the Hierarchical Structure of Science”, *Science*, 177 (4047).
- Argyris, C., y D. A. Schön (1978), *Organizational Learning: a Theory of Action Perspective*, Massachusetts, Addison-Wesley.
- (1952), *Homeostasis. Transactions of the Ninth, Conference on Cybernetics*, Josiah Macy Foundation, pp. 73-108.
- Arthur, W. B. (1999) “Complexity and the economy”, *Science*, 284.
- (1990), “Positive Feedbacks in the Economy”, *Scientific American*, 262, pp. 92-99.
- Ashby, W. R. (1956), *An Introduction to Cybernetics*, Reino Unido, Londres, Chapman & Hall.
- (1952), *Design for a Brain: The origin of adaptive behavior*, Londres, Chapman & Hall.

- (1947), “Principles of the Self-Organizing Dynamic System”, *Journal of General Psychology*, 37, pp. 125-128.
- Auyang, S. Y. (1988), *Foundations of Complex-System Theories in Economics, Evolutionary Biology and Statistical Physics*, Cambridge University Press.
- Barabási, Albert-László (2009), “Pushing Networks to the limit. Scale-Free Networks: A Decade and Beyond”, *Science*, 325 (412). Consultado en [www.sciencemag.org](http://www.sciencemag.org).
- (2007), “The Architecture of Complexity. From network structure to human dynamics”, *IEEE Control Systems Magazine*, agosto.
- (2000) “Scale-free characteristics of random networks: The topology of the www”, *Physica, A* 281.
- , y Jeong, H. (1999), “Diameter of the www”, *Nature*, 401, pp. 130-131.
- Bar-Yam, Yaneer, (1997), *Dynamics of Complex Systems*, Nueva York, Perseus Books.
- (2005), *Making Things Work: Solving Complex Problems in a Complex World*, Cambridge, MA, Knowledge Press.
- Beautement, P., y Broenner C. (2011), *Complexity Demystified: A guide for practitioners*, Devon, Reino Unido, Triarchy Press.
- Bertalanffy von, L. (2001), *Teoría general de los sistemas. Fundamentos, desarrollo, aplicaciones*, México, Fondo de Cultura Económica.
- Bhaskar, R. (1975), *A Realist Theory of Science*, West Yorkshire, Leeds Books.
- Blumer, H. (1969), *Symbolic Interactionism*, Englewood-Cliffs, NJ, Prentice Hall.
- Boccaro, N. (2004), *Modeling Complex Systems*, Berlin, Springer.
- Bravo, V. (1980), “La construcción del objeto de estudio en Marx, Durkheim y Weber”, en V. Bravo *et al.* (eds.), *Teoría y realidad en Marx, Durkheim y Weber*, México, Juan Pablós.
- Broder, Abdre y otros (2000), “Graph structure in the web”, *Computer Networks*, 33.
- Broida A., Claffy K. (2001), *Internet topology: Connectivity of IP graphs. In scalability and Traffic Control in IP Networks, in Proceedings SPIE*, S. Fahmy and K. Park, (eds.), vol. 4526, International Society for Optical Engineering, Bellingham, WA.
- Buckley, W. (1998), *Society: A Complex Adaptive System: Essays in Social Theory, Países Bajos*, Amsterdam, Gordon and Breach Publishers.
- (ed.) (1968), *Modern Systems Research for the Behavioral Scientist*, EUA Chicago, Aldine Publishing Co., p. xxiv.
- (1967), *Sociology and Modern Systems Theory*. Englewood Cliffs, N. J.: Prentice-Hall.
- Bunge, M. (1972), *Teoría y Realidad*, Barcelona, Ariel.
- Byrne, D.S. y Rogers, T. (1996), “Divided Spaces: divided schools”, *Sociological Research Online*, 1(2). Disponible en <http://www.socresonline.org.uk/socresonline/1/2/3.html>.

- Byrne, D. (2009), "Working within a complexity frame of reference —the potential of "integrated methods" for understanding transformation in complex social systems", *CFSC Consortium's paper for UNAIDS on expanding the monitoring and evaluation of Social Change Communication for HIV/AIDS prevention*, julio 2009.
- , D.S. y Rogers, T. (1996), "Divided Spaces: divided schools", *Sociological Research Online*, 1(2). Disponible en <http://www.socresonline.org.uk/socresonline/1/2/3.html>.
- Cannon, W. B. (1932), *The Wisdom of the Body*, Nueva York, W. W. Norton.
- Capra, Fritjof, (2002), *The Hidden Connections: A Science for Sustainable Living*. Harper Collins publishers, Reino Unido. Disponible en [www.neurospot.net/ftjfCapra/surface.jpg](http://www.neurospot.net/ftjfCapra/surface.jpg). Consultado en abril de 2011.
- Cardoso, F. H., y E. Faletto (1979), *Dependency and Development in Latin America*, San Francisco, University of California Press.
- Carrington, P. J., J. Scott, y S. Wasserman (2005), *Models and Methods in Social Network Analysis*, Cambridge, Cambridge University Press.
- Castañeda, G. (2009), "Sociomática: El estudio de los sistemas adaptables complejos en el entorno socioeconómico", *El Trimestre Económico*, 76 (1), 30, pp. 5-64.
- Checkland, P. B. (1981), *Systems Thinking, Systems Practice*, Londres, John Wiley & Sons Ltd.
- , y J. Poulter (2006), *Learning for Action: A short definitive account of Soft Systems Methodology and its use for practitioners, teachers and students*, Chichester, Reino Unido, John Wiley & Sons.
- Chowell, G., Hyman, J.M., Euban, k S., Castillo-Chavez, C. (2002), "Scaling laws for the movement of people between locations in a large city". *Phys. Rev*, E 68.
- Christopherson, S. *et al.* (2010), "Regional resilience: a theoretical and empirical perspectives", *Cambridge Journal of Regions, Economy and Society*, 2010 (3).
- Churchman, C. W. y Ackoff, R. L. (1968), *The Systems Approach*, Nueva York, Dell.
- ,(1950), "Purposive Behavior and Cybernetics," *Social Forces*, 29 (1), pp. 32-39.
- Cilliers, P. (1998), *Complexity and Postmodernism*, Nueva York, Routledge.
- Clark, J. y otros (2010), "A typology of 'innovation districts': what it means for regional resilience", *Cambridge Journal of Regions, Economy and Society*, 2010 (3).
- Clippinger, J. III (ed.) (1999), *The Biology of Business: Decoding the Natural Laws of Enterprise*, EUA, San Francisco, Jossey-Bass Publishers.
- Conway, S., Jones, O. y Steward, F. (2001), "Realising the potential of the social network perspective in innovation studies", en O. Jones y S. Conway (eds.):

- Social Interaction and Organizational Change: Aston Perspectives on Innovation Networks*, Londres, Imperial College Press, pp. 349-366.
- Crone, J. A. (2011), *How Can We Solve our Social Problems?* Los Angeles, Sage.
- Daly, A. y Finnigan, K.S. (2009), "A bridge between worlds: understanding network structure to understand change strategy", *Journal Education Change*, 2010, 11.
- Dasgupta C. y Valls O. T. (1999), "Free energy landscape of a dense hard sphere system", *Physical Review*, E 59, 3123.
- D'Ambrosio, U. (1997), "Ethnomathematics and its place in the history and pedagogy of mathematics." en Powell, A. y Frankenstein, M. (eds.) *Ethnomathematics. Challenging Eurocentrism in Mathematics Education*, EUA, Albany, State University of New York.
- De Latil, P. (1958), *El Pensamiento Artificial: Introducción a la Cibernética*, Buenos Aires, Losada.
- Dilthey, W. (1944), "Orígenes de la hermenéutica", en E. Imaz (pról. y trad.), *Obras de Wilhelm Dilthey: El mundo histórico*, 7, pp. 321-342, México, Fondo de Cultura Económica.
- Dooley, K. (1996), *A Nominal Definition of Complex Adaptive Systems*, *The Chaos Network*, 8 (1), pp. 2-3.
- Doye P. K. J. (2002), "Network topology of a potential energy landscape: A static scale-free network", *Physical review letters* 88, pp. 23.
- Dubois, D., y H. Prade (1980), *Fuzzy Sets and Systems*, Nueva York, Academic Press.
- Durkheim, E. (1967), *Les Regles de la Méthode Sociologique*, París, PUF.
- Eckerman, J. P. (2005), *Conversaciones con Goethe*, España, El Acantilado.
- Emery, F. E. (ed.) (1969), *Systems Thinking*, Baltimore, Penguin.
- , y F. E. Trist (1973), *Towards a Social Ecology*, Londres, Plenum Press.
- Epstein, J. M. (2006), *Generative social science*, Nueva Jersey, Princeton University Press.
- , y R. Axtell (1996), *Growing Artificial Societies: Social Science from the Bottom Up*, EUA, Cambridge Massahusett, MIT Press.
- Eve, R. A. (1997), *Chaos, Complexity, and Sociology: Myths, Models, and Theories*, Thousand Oaks, CA, SAGE.
- Faloutsos, M., Faloutsos, P., y Faloutsos, C. (1999), "On power-law relationships of the internet topology", *Computer Communications Review*, 29, pp. 251-262.
- Faust, K. (2002), "Las redes sociales en las ciencias sociales y el comportamiento", en Gil, J y Samuel Schmidt S. (eds.), *Análisis de redes: aplicaciones en ciencias sociales*, pp. 1-14, México, IIMAS-UNAM.
- Feigenbaum, M. J. (1978), *Quantitative Universality for a Class of Non-Linear Transformations*, *Journal of Statical Physis*, 19 (1), pp. 25-52.
- Fernandez, E. C. (2007), "Practical recommendations to enable organizational

- reconfigurability from a complex systems perspective”, en XVII Congreso ACEDE: Flexibilidad y Cambio ante un Nuevo Escenario Competitivo, España, Sevilla.
- Fernández de Velazco, F., y F. Lara-Rosano (2016), *A Guided Self-organization Approach for Planning the Undergraduate Musical Education Program at the School of Arts of the University of Puebla, Mexico*, en G. E. Lasker, H. Schinzel y K. Boullart (eds.), *Art and Science* (14), Windsor, Canadá, IIAS, pp. 11-15.
- (2016), *Intervención de tipo organizacional a través de un proceso de autoorganización guiada, en pro de un cambio educativo en el Conservatorio Nacional de Música de la Ciudad de México*. Proc. Sexta Conferencia Iberoamericana de Complejidad, Informática y Cibernética, *CICIC 2016*, Orlando, FL, pp. 181-185.
- (2015), “Organizational Change Intervention at the National Conservatory of Mexico City through Guided Self-Organization”, en G. E. Lasker, H. Schinzel y K. Boullart (eds.), *Art and Science* (13), Windsor, Canadá: IIAS, pp. 23-27.
- Flake, Lawrence Giles y otros (2002), “Self organization and identification of Web communities”, *IEEE Computer*, 35.
- Forrester, J. W. (1973), *World Dynamics*, Cambridge, Massachusett, Wright-Allen Press.
- (1968), *Principles of Systems*, Cambridge, Massachusett, Wright-Allen Press.
- (1961), *Industrial Dynamics*, Cambridge, Massachusett, MIT Press.
- Freeman, L. C. (1996), “Some antecedents of social network analysis”, *Connections*, 19, pp. 39-42.
- Fuchs, Ch. (2004), “Knowledge Management In Self-Organizing Social Systems”, *Journal of Knowledge Management Practice*, mayo 2004.
- Gadamer, H. G. (1977), *Fundamentos para una teoría de la experiencia hermenéutica, Verdad y Método*, vol. 1, Salamanca, Ediciones Sígueme.
- Galam, S. (2012), *Sociophysics: A physicist’s modeling of psycho-political phenomena*, Nueva York, Springer.
- Gardner, M. (1970), “Mathematical Games: The fantastic combinations of John Conway’s Nueva solitaire game Life”, *Scientific American*, 223, pp. 120-123.
- Gelman, O., y G. Negroe (1982), “La planeación como un proceso de conducción”, *Revista de la Academia Nacional de Ingeniería, México*, 1 (4), pp. 253-270.
- Gergen, K. J. (1999), *An Invitation to Social Construction*, Londres, SAGE.
- Geyer, F., y J. van der Zouwen (1992), *Sociocybernetics. In Negoita CV Handbook of Cybernetics*, Nueva York, Marcel Dekker, pp. 95-124.

- Geyer, F. (1994), "The Challenge of Sociocybernetics. Symposium VI: Challenges to Sociological Knowledge", 13th World Congress of Sociology, Alemania, Bielefeld, julio 18-24, 1994.
- Giddens, A. (1998), *The Third Way. The Renewal of Social Democracy*, Cambridge, Polity Press.
- (1991), *Modernity and Self-Identity. Self and Society in the Late Modern Age*, Cambridge, Polity Press.
- Gilbert, N. (2008), *Agent-Based Models*, Los Ángeles, SAGE.
- Gleick, J. (1987), *Chaos: Making a Nueva Science*, (país), Viking.
- Goethe, J. W. von (1947), *Die Schriften zur Naturwissenschaft*, Weimar, Alemania, Deutschen Akademie der Naturforscher.
- Goffman, E. (1959), *The Presentation of Self in Everyday Life*, (país), Anchor.
- Gould, S.J, y Eldredge, N. (1977), "Punctuated equilibria: the tempo and mode of evolution reconsidered", *Paleobiology*, 3 (2).
- Gros, C. (2008), *Complex and Adaptive Dynamical Systems*, Berlín, Springer.
- Haken, H. (1978), *Synergetics*, Berlín, Springer.
- Hall, Arthur D. (1989), *A Metasystems Methodology; a New Synthesis and Unification*, Nueva York, Pergamon Press.
- , (1962), *A Methodology for Systems Engineering*, Nueva Jersey, Van Nostrand.
- , y Fagen, Robert E. (2008), "Definition of System", en *General Systems*, vol. 1 (1956). Reproducido en Buckley, Walter, *Systems Research for Behavioral Science: a Sourcebook*, Penguin Books.
- Hannan, M. T. y J. Freeman (1989), *Organizational Ecology*, Cambridge, Massachusetts, Harvard University Press.
- Hansen, M.T. (2002), "Knowledge Networks: Explaining Effective Knowledge Sharing in Multiunit Companies", *Organization Science*, 13 (3), Knowledge, Knowing, and Organizations, Mayo-Junio, 2002.
- Hassink, R. (2010), "Regional resilience: a promising concept to explain differences in regional economic adaptability?", *Cambridge Journal of Regions, Economy and Society*, 2010, (3). Heidegger, M. (1951), *El ser y el tiempo*, México, Fondo de Cultura Económica.
- Hewitt, J. P. (1976), *Self and Society*, Boston, Allyn & Bacon.
- Heyligen, F. (1989), "Self-organization, emergence and the architecture of complexity", *Proceedings of the 1st European Conference on System Science*, París, AFCET, pp. 23-32.
- Hodgson, G. M. (1999), *Evolution and Institutions*, EUA, Edward Elgar Pub.
- Holland, J. H. (1996), *Hidden Order: How Adaptation Builds Complexity*, Basic Books–Helix Books.
- (1995), *Emergence: From Chaos to Order*.
- (1995), *Hidden Order: How Adaptation Builds Complexity*, Helix Books.



- Johnson, S. (2002), *Emergence: The Connected Lives of Ants, Brains, Cities and Software*, Nueva York, Penguin Books.
- Kalapala V., Sanwalani V., Clauset A., Moore C., (2006). "Scale invariance in road networks", *Phys. Rev.*, E 73.
- Kant, Immanuel (1998), *Critique of the Pure Reason*, Cambridge, Cambridge University Press.
- (1991), *Crítica de la facultad de juzgar*, Venezuela: Monte Ávila Editores.
- (1970), *Crítica de la razón pura*, Argentina, Losada.
- Karmeshu, y F. Lara-Rosano (1987), *Modelling data uncertainty in growth forecasts. Applied Mathematical Modelling*, 11, 62-68.
- Kauffman, Stuart Alan (1993), *The Origins of Order. Self Organization and Selection in Evolution*, Nueva York, Oxford University Press.
- (1995), *At Home in the Universe*, Oxford, Oxford University Press.
- Kaufmann, S. (1995b), *At Home in the Universe: The Search for Laws of Self-Organization and Complexity*. Nueva York, Oxford University Press.
- Kleinberg, Kumar, Raghavan y otros (2002), *The Web as a Graph*, 1999.
- Klondahl, Potterat, Woodhouse y otros 1994 "Social networks and infectious disease; The Colorado Springs study", *Soc. Ci. Med.* 38.
- Kim, T. Y, Oh H. y Swaminathan A. (2006), "Framing interorganizational network change: A network inertia perspective", *Academy of Management Review*, 31(3).
- Klir, G. (2001), "Facets of Systems Science", *Systems Science and Engineering*, 15, Nueva York, Springer.
- Kosik, K. (1967), *Dialéctica de lo Concreto*, México, Grijalbo.
- Kuhn, T. S. (1971), *La estructura de las revoluciones científicas*, México, Fondo de Cultura Económica.
- Langton, Ch. G. Langton (1990), "Computation at the edge of chaos", *Physica D*, 42.
- Lara-Rosano, F. (2016a), "Las ciencias de la complejidad en la solución de nuestros problemas sociales", *Sistemas, Cibernética e Informática*, 13 (2), pp. 43-50.
- (2016b), "Bases teórico-metodológicas para el diagnóstico de organizaciones complejas" en P. E. Balderas Cañas y G. N. Sánchez Guerrero (eds.), *Ingeniería de Sistemas: Metodologías y Técnicas*, México, Plaza y Valdés, pp. 19-38.
- (2014 a), "Petri Models of Purposeful Complex Dynamic Systems" en *ISCS 2014 Interdisciplinary Symposium on Complex Systems*, A. Sanayei, O. E. Rössler & I. Zelinka (eds). Alemania, Heidelberg, Springer, pp 183-191. ISBN 978-3-319-10758-5. DOI: 10.1007/978-3-319-10759-2\_20.
- (2014 b), "Evaluation of Complex Intervention Projects", 14th European Conference on Complex Systems ECCS'14, Septiembre, Italia, Lucca, 2014.

- Lara-Rosano, F. (2013), Cátedras del *Seminario métodos y modelos de la complejidad social*, México, Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico CCADET/UNAM, 2010-2013.
- , y A. Quiroga Carapia (2012), *Planificación de Estrategias de la Red de Espacios de Innovación Socioambiental*, San Cristobal de Las Casas, ECOSUR.
- (2011), “Complejidad en las organizaciones” en J. Flores y M. Martínez (eds.), *Encuentros con la Complejidad*, México, Siglo XXI y UNAM.
- (2010), “Conceptos y fenómenos fundamentales de nuestro tiempo”, en Grupo Google *Tecnociencias y Complejidad*. Disponible en: <http://groups.google.com/group/tecnociencias-y-complejidad?hl=es>.
- (2006), “Conceptos básicos en tecnología y sistemas sociotécnicos” en P. González Casanova y M. Roitman Rosenmann (eds.), *La formación de conceptos en ciencias y humanidades*, México, Siglo XXI, pp. 103-125.
- (2002), “Cibernética y sistemas cognitivos” en J. Acosta Flores (ed.), *Ingeniería de Sistemas: un enfoque interdisciplinario*, México, Alfaomega.
- (1995), “Fuzzy Cal Impact Connectionist Models of Dynamic Systems” en G. E. Lasker (ed), *Advances in Systems Studies*, vol. II. Windsor, Canada, IIAS, pp. 22-26.
- (1994), “Fuzzy Cal Modeling of Complex Systems through Petri Paradigm and Neural Nets”, en G. E. Lasker (ed.), *Advances in Artificial Intelligence and Engineering Cybernetics*, vol. III, Windsor, Canada: IIAS, pp. 125-129.
- (1990), *Metodología para la planeación de sistemas: un enfoque prospectivo*, México, Dirección General de Planeación, Evaluación y Proyectos Académicos, UNAM.
- (1981), “Prospección de eventos interrelacionados mediante segundos momentos”, *Series del Instituto de Ingeniería UNAM*, 436.
- , y W. M. Sachs (1978), “Modelling of the environment through a system of models”. *Applied Mathematical Modelling*, vol 2, pp 216-219.
- (1977), “La técnica TKJ de planeación participativa”, *Cuadernos Prospectivos*, A (6), pp. 1-5.
- Latora, V., y Marchiori, M. (2001), “Efficient Behavior of Small-World Networks” *Physical Review Letters*, 87(19).
- Linstone, H. A., y M. Turoff (eds.) (1972), *The Delphi Method*, Nueva York, Universe Books.
- Lorenz, E. N. (1963), “Deterministic Nonperiodic Flow”, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 20 (2), pp. 130-141.
- Luhmann, N. R. Luhmann, N. R. (1998), *Sistemas sociales: lineamientos para una teoría general*, Barcelona, Antrhopos.
- (1997), *Organización y decisión, autopoiesis y entendimiento comunicativo*. Barcelona, Antrhopos.
- (1984), *Social Systems*, Stanford, CA, Stanford University Press.



- MacKay, D. M. (1966), "Cerebral organization and the conscious control of action" en J. C. Eccles (ed.), *Brain and conscious experience*, Springer, Berlín, pp. 422-440.
- Mainzer, K. (2007), *Thinking in Complexity: The Computational Dynamics of Matter, Mind and Mankind*, Berlín, Springer.
- Mandelbrot, Benoît (1993), *Los objetos fractales. Forma, azar y dimensión*, España, Tusquets Editores.
- Mandelbrot, B. B. (1975), *Les Objets Fractals: Forme, Hasard et Dimension*, , París, Flammarion.
- Marion, R. (1995), *The Edge of Organization: Chaos and Complexity Theories of Formal Social Systems*, Thousand Oaks, CA, SAGE.
- Marx, C. (1999), *El capital. Crítica de la economía política* (t. I), México, Fondo de Cultura Económica.
- Maruyama, M. (1963), "The Second Cybernetics: Deviation-Amplifying Mutual Cal Processes", *American Scientist*, 5.
- Maturana Romesín, Humberto y Varela García, Francisco J. (1998), *De máquinas y seres vivos. Autopoiesis: la organización de lo vivo*, Chile, Editorial Universitaria, Santiago.
- May, R. (1976), "Simple Mathematical Models with Very Complicated Dynamics", *Nature*, 261, p. 459.
- McMillan, E. (2008), *Complexity, Management and the Dynamics of Change*, Londres, Routledge.
- Meadows, D. M., et al. (1972), *The Limits to Growth*, Nueva York, Universe Books.
- Milgram, Stanley (1967), "The Small World Problem", *Psychology Today* 5, pp. 60-67.
- Mischen, P. y Jackson, S.K. (2008), "Connecting the Dots: Applying Complexity Theory, Knowledge Management and Social Network Analysis to Policy Implementation", *Public Administration Quarterly*, 32 (3).
- Mises, L. von (1998), *Human Action: A Treatise on Economics*. Auburn, ALA, The Ludwig von Mises Institute.
- Mitchell, M. (2009), *Complexity: A Guided Tour*, Oxford, Oxford University Press.
- Mitleton-Kelly, E. y Land, F. (2003), "Complexity and Information Systems", en *Blackwell Encyclopaedia of Management* (2 ed.), volumen *Management Information Systems*.
- Molina, J.L. (2007), "Panorama de la investigación en redes" presentado en el *Coloquio internacional: Redes Teoría y Práctica*, organizado por el Laboratorio de Redes del IIMAS-UNAM, agosto 27 al 29 de 2007, México, CDMX.
- Morin, E. y otros (2002). *Educación en la era planetaria. El pensamiento complejo como método de aprendizaje en el error y la incertidumbre humana*. UNESCO-Gedisa.

- Newman, M., A.-L. Barabási y D. J. Watts (2006), *The Structure and Dynamics of Networks*, NJ. Princeton University Press,
- , M. E. J. (2003), “The structure and function of complex networks”. Paper Arxiv: cond-mat/0303516 v1. 25 Mar. 2003. Department of Physics, University of Michigan. . También ubicable en la www: SIAM Review, 45 (2), pp. 167-256.
- Nicolescu, Basarab (2002), *La Transdisciplinariedad. Manifiesto*. México, Multi-versidad Mundo Real Edgar Morin, 1996.
- , (1996), *La Transdisciplinariedad*, París, Du Rocher.
- Nicolis, G. y Rouvas-Nicolis, C. (2007), “Complex Systems”, *Scholarpedia*, 2 (11). Disponible en [http://www.scholarpedia.org/article/Complex\\_systems](http://www.scholarpedia.org/article/Complex_systems).
- Nicolis, G. (1995), *Introduction to Nonlinear Science*, Cambridge, Cambridge University Press.
- Nicolis, G., y I. Prigogine (1994), *La estructura de lo complejo*, Madrid, Alianza.
- Nowak, A., R. R. Vallacher, A Tesser, y, W. Borkowski (2013), “Dynamical Social Psychology: An Introduction”, en A. Nowak, K. Winkowska-Nowak, y D. Brée (eds.), *Complex Human Dynamics: From Mind to Societies*, Berlín, Springer.
- , (1990), “Society of self: the emergence of collective properties in self-structure”, *Psycho*, 107, pp. 39-61.
- Parsons, T. (1964), *The Social System*, Nueva York, Free Press.
- (1967), *The Structure of Social Action*, Nueva York, Free Press.
- Platón (1872), *Diálogos, Obras Completas*, Madrid, Edición de Patricio de Azcárate.
- Poincaré, J. (1892), *Les Methodes Nouvelles de la Mécanique Celeste*, París, Gauthier-Villars.
- (1903), *Science et Methode*, París, Ernest Flammarion.
- Popper, K. R. (1945), *The Open Society and its Enemies*, Londres, Routledge.
- Poston, T., y I. Stewart (1977), *Catastrophe Theory and its Applications*, Londres, Pitman.
- Prigogine, I. (1997), *End of Certainty*, Nueva York, The Free Press.
- Prigogine, Ilya (1996), *El fin de las incertidumbres*. Chile, Andres Bello.
- , y I. Stengers (1984), *Order out of Chaos: Man's Nueva dialogue with nature*, Reino Unido, Flamingo.
- , (1961), *Introduction to Thermodynamics of Irreversible Processes*, Nueva York, Interscience.
- , y G. Nicolis (1977), *Self-Organization in Non-Equilibrium Systems*, Nueva York, Wiley.
- Recasens Siches, Luis, (1978), *Wiese*. México, Fondo de Cultura Económica.
- Redner, S. (1998), *How Popular is Your Paper? An Empirical Study of the Citation Distribution*. Boston University, Cornell University Library.
- Rescher, N. (1969), *Many-valued Logic*, Nueva York, McGraw-Hill.

- Rosenau, J. N. (1997), *Along the Domestic-Foreign Frontier: Exploring Governance in a Turbulent World*, Cambridge, Cambridge University Press.
- Rosenblueth, A., N. Wiener, y J. Bigelow (1943), "Behavior, Purpose and Teleology", *Philosophy of Science*, 10, pp. 18-24
- Ruelle, D., y F. Takens (1971), "On the nature of turbulence", *Communications, Mathematical Physics*, 20, pp. 167-192.
- Saaty, T. L., y J. P. Bennett (1977), "A theory of analytical hierarchies applied to political candidacy", *Behavioral Sciences*, 22, pp. 237-245.
- Sardar, Ziauddin y Abrams Iwona (2006), *Caos para todos*, España, Barcelona, Paidós.
- Sawyer, R. K. (2005), *Social Emergence: Societies as Complex Systems*, Cambridge, Cambridge University Press.
- Schon, D. A. (1971), *Beyond the Stable State*, Nueva York, W. W. Norton, H. G. Schuster, H. G., y W. Just (2005), *Deterministic Chaos: an Introduction*, Nueva York, Wiley.
- Schumpeter, J.A. (1935), *Análisis del cambio económico*. Publicado originalmente en *The Review of Economics Statistics*, vol. XVII, núm. 4, mayo 1935, pp. 2-10. Reeditado como capítulo en Gottfried Haberler, 1944, *Readings in business cycle theory*. Traducido al español y publicado en *Ensayos sobre el ciclo económico*, Fondo de Cultura Económica, México, 1944.
- Scott, J. (2000), *Social Network Analysis: A Handbook*, Londres, Sage Publications.
- Simon, D., y K. J. Holyoak (2002), "Structural dynamics of cognition: from consistency theories to constraint satisfaction", *Pers. Soc. Psychol.* (completo), 6, pp. 283-294.
- Singer, E. A. (1959), *Experience and Reflection*, Filadelfia, University of Pennsylvania Press.
- Spillane, J. (2006), "Network analysis, complexity, and brain function", *Complexity*, 8, vol. 1, pp. 56-60.
- Sporns, O, Tononi, G., y Edelman, G. M (2000), "Theoretical neuroanatomy: Relating anatomical and functional connectivity in graphs and cortical connection matrices", *Cerebral Cortex* 10, pp. 127-141.
- Stacey, R. (2001), *Complex Responsive Processes in Organizations: Learning and Knowledge Creation (Complexity and Emergence in Organizations)*, Londres, Routledge.
- Strogatz, S. (2003), *Sync: The Emerging Science of Spontaneous Order*, Nueva York, Hyperion Books.
- , (2001), "Exploring complex networks", *Nature*, vol. 410. Consultado en [www.nature.com](http://www.nature.com).
- Taylor, R. (1950), "Purposeful and Non-Purposeful Behavior: A Rejoinder", *Philosophy of Science* 17, 4, pp. 327-332.

- Thagard, P. (1989), "Explanatory coherence", *Behav. Brain Sci.* (completo), vol. 12, pp. 435-467.
- Varela, F. J., Maturana, H.R. y Uribe, R. (1974). "Autopoiesis: the organization of living systems, its characterization and a model", *Biosystems*, 5.
- Velázquez-Guzmán, M. G., y F. Lara-Rosano (2016), "La Complejidad de la Construcción de la Convivencia Comunitaria en la Escuela: Un Enfoque Hermenéutico", *Proc. Sexta Conferencia Iberoamericana de Complejidad, Informática y Cibernética CICIC 2016*, Orlando, FL, pp. 161-165.
- Von Bertalanffy, L. (1989), *Teoría general de los sistemas*. México, Fondo de Cultura Económica.
- , (1968), *General System Theory. Foundations, Development, Applications*, Nueva York, George Braziller.
- , L.Von Foerster, H., Pask, G. (1961), "A Predictive Model for Self-Organizing Systems," parte I, *Cybernetica* 3, pp. 258-300; Parte II, *Cybernetica* 4, pp. 20-55.
- Von Hayek, F. A. (1948), *Individualism and Economic Order*, Chicago, University of Chicago Press.
- Wallerstein, Immanuel (2001), *The End of the World As We Know It: Social Science for the Twenty-First Century*, USA, University of Minnesota Press.
- (2001), *Conocer el mundo, saber el mundo: el fin de lo aprendido*, México, UNAM/Siglo XXI.
- , (1987), *Análisis de sistemas-mundo*, México, Siglo XXI.
- Watts, Duncan J. y Strogatz, Steven H. (1998), "Collective dynamics of small world' networks" *Nature* 392, p. 440.
- Weaver, W. (1948), "Science and complexity", *American Scientist*, 36, pp. 536-544.
- Weisbuch (1992), *Complex Systems Dynamics*.
- Weisstein, Eric W. (1998), «Attractor.» "An examination of Applicability of Complex Systems Theory to Policy Making". Curso 5603 The National Security Process, National War College, Washington.
- Wenger E. (1998), *Communities of Practice*, Cambridge, Cambridge University Press.
- West G. B., Brown J. H. y Enquist B. J. (1999). The four dimension of life: fractal geometry and allometric scaling of organisms. *Science* vol. 284.
- White, Humbert D., Wellman, B., and Nazer, Niels: "Does citation reflect social structure? Longitudinal evidence from the 'Globenet' interdisciplinary research group", *Preprint*, University of Toronto, 2003 y 2005. Disponible en [http://www.tendencias21.net/Todas-las-redes-complejas-presentan-estructuras-basicas-similares\\_a12045.html](http://www.tendencias21.net/Todas-las-redes-complejas-presentan-estructuras-basicas-similares_a12045.html).
- Wiener, N. (1961), *Cybernetics*, EUA, Cambridge Masschusetts, MIT Press.

- , (1948), *Cybernetics, Control and Communication in the Animal and the Machine*, Boston, MA, The Technology Press.
- Wolfram, S. (2002), *A Nueva Kind of Science* (país), Wolfram Media.
- Zadeh, L. A. (1965), “Fuzzy Sets”, *Information and control*, 8, pp. 338-353.

