

# Pensamiento sistémico, complejidad y modelos de simulación: paradigmas para enfrentar los retos del siglo XXI

Leopoldo Sánchez Cantú\*

## Resumen

Proponemos que el pensamiento sistémico y el pensamiento complejo son paradigmas adecuados para comprender y enfrentar los problemas retadores de la humanidad, y para diseñar abordajes más efectivos, equitativos, éticos y sostenibles. Se describen los llamados “problemas perversos”, mostrando la importancia de reconocerlos y destacando las razones que los hacen particularmente difíciles de comprender y manejar. Además, se describen el pensamiento sistémico y el pensamiento complejo, y se justifica que, para comprender las múltiples dimensiones de los problemas perversos, es indispensable el abordaje transdisciplinar. Se enuncian las metodologías utilizadas por las ciencias de la complejidad, clasificadas en tres tipos de modelos: (1) cualitativos agregados, (2) cuantitativos agregados y (3) individuales. Adicional, se puntualizan las características más importantes de los modelos de simulación en general, destacando el enfoque sobre el problema de interés. En la conclusión, se resaltan factores que deberán tenerse presentes al abordar los problemas más apremiantes de la comunidad.

### Palabras clave:

pensamiento sistémico; problemas perversos; complejidad; modelos de simulación.

### Clasificación JEL:

A12, C63, D81

---

**Cómo citar este artículo:** Sánchez-Cantú, L. (2025). Pensamiento sistémico, complejidad y modelos de simulación: paradigmas para enfrentar los retos del siglo XXI. *Equidad y desarrollo*, (46). <https://doi.org/10.19052/eq.voll.iss46.5389>

---

Fecha de recibido: 18 de mayo de 2025

Fecha de aprobado: 16 de junio de 2025

\* Doctor en Ingeniería de Sistemas del Instituto Politécnico Nacional (México), Magíster en Ciencias de la Universidad McGill (Canadá) y Médico Cirujano de la Universidad de La Salle (México). Docente de la Facultad de Economía, Empresa y Desarrollo Sostenible. Universidad de La Salle, Bogotá. Correo electrónico: lesanchez@unisalle.edu.co. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6438-9731>



# Systems Thinking, Complexity and Simulation Models: Paradigms for Meeting 21st Century Challenges

## Abstract

We argue that systems thinking and complexity thinking provide essential paradigms for understanding and addressing humanity's most pressing challenges. These frameworks offer valuable tools for designing solutions that are not only more effective but also more equitable, ethical, and sustainable. In this context, we examine so-called “wicked problems”—issues characterized by high levels of uncertainty, interdependence, and resistance to straightforward solutions. We emphasize the importance of recognizing such problems and explore the factors that make them particularly difficult to analyze and resolve. Systems thinking and complexity thinking are described in detail, and we demonstrate that grasping the multifaceted nature of wicked problems necessitates a transdisciplinary approach. We also classify the methodologies employed in complexity science into three broad categories: (1) aggregated qualitative models, (2) aggregated quantitative models, and (3) individual-based models. Key characteristics of simulation modeling are discussed, with particular emphasis on problem-oriented design. In conclusion, we highlight critical considerations for effectively tackling the most urgent issues facing communities today.

### Key words:

Systems thinking; wicked problems; complexity; simulation modelling.

### JEL classification:

A12, C63, D81

*El conocimiento se construye a contracorriente,  
confrontando lo ya dicho. Es una ruptura con el sentido común.  
Es una acción polémica incesante de la razón.*  
Bourdieu et al., 1973

## Introducción

Así como un embrión en sucesivos estadios de desarrollo muestra características de especies distintas a la propia, recordando su filogenia<sup>1</sup> en su ontogenia<sup>2</sup>, las ciencias de la complejidad, en cuyo linaje hay tanto ciencias naturales como

<sup>1</sup> *Filogenia* hace referencia al origen y desarrollo evolutivo de las especies, y de las distintas estirpes de seres vivos.

<sup>2</sup> *Ontogenia* hace alusión al desarrollo del individuo, referido en especial al período embrionario.

ciencias sociales, matemáticas, tecnología y humanidades, han atravesado por etapas sucesivas de desarrollo, han cambiado su aspecto a lo largo de los últimos 70 años<sup>3</sup> y, conforme el paradigma mecanicista reduccionista, ha dado espacio al paradigma holístico, orgánico y dinámico.

Poco a poco la ciencia dejó atrás la ilusión de objetividad y certezas, y se ha convencido de que, en sistemas complejos, comprender la naturaleza de las partes no implica comprender por qué y cómo el todo hace lo que hace. En esta transformación epistemológica, se ha elevado al primer plano el interés por descubrir las leyes que explican la estructura y los patrones que surgen de procesos dinámicos observables en distintas escalas de organización.

El cambio comenzó como ideas aisladas en mentes creativas, inquisitivas y críticas. Paulatinamente, se fueron conectando los científicos que encontraban que el método reduccionista era insuficiente para explicar los problemas más retadores que enfrentaba la humanidad. En el curso de 50 años, se alcanzó lo que ahora vemos como una transición de fase: corazonadas aisladas, intuiciones atrevidas y obsesiones privadas se fusionaron en una nueva forma de ver el mundo, surgiendo, primero, el pensamiento sistémico y, más tarde, las ciencias de la complejidad y los modelos de simulación digital.

Tras años de investigaciones desconectadas, los trabajos de Ludwig von Bertalanffy, Alan Turing, Claude Shannon, Norbert Wiener, Warren McCulloch, Ross Ashby, Warren Weaver, Gregory Bateson, Kenneth Boulding, John Holland, Ilya Prigogine y otros iniciaron una revolución en la forma en que los miembros de la comunidad científica pensamos sobre el mundo, catalizada por la versatilidad y potencia del computador accesible a todos.

Se ha abandonado la idea de un mundo que trabaja como el mecanismo de un reloj, estable, predecible y controlable, gestionado desde el centro por entidades superiores con el poder de halar los hilos del sistema para producir sus efectos. Ese modelo ha sido sustituido por una visión orgánica, dinámica, poblada de incertidumbre, de aleatoriedad y de “emergencias”, cuyo devenir a nivel macro (general) es resultado de patrones de comportamiento en el nivel micro (local): un mundo exento de control central y en gran medida impredecible (Prigogine, 1997).

Este cambio paradigmático ha infiltrado las diferentes áreas del trabajo científico y las diversas disciplinas. Comenzó en biología con von Bertalanffy, de ahí

---

<sup>3</sup> Hemos elegido la publicación de *Science and Complexity* de Warren Weaver (1948) como punto de partida o “nacimiento” de las ciencias de la complejidad.

pasó a física y química para, posteriormente, impactar a las ciencias sociales, destacando su presencia en economía<sup>4</sup>, psicología (Bateson, 1977) y sociología (Parsons, 1951; Luhmann, 1998).

4 Más allá de una profesión o una ciencia especial, la visión de sistemas complejos es ajena a barreras disciplinares, ideológicas y metodológicas, entendiendo que no existe una disciplina ni un punto de vista que sea suficiente para comprender los fenómenos más complejos.

Partiendo de estos conceptos, buscamos crear consciencia de la necesidad de pensar de una nueva forma, destacando la necesidad de comprender cómo un organismo o una organización produce lo que produce, antes de intervenirlos. Para esto, será necesario descubrir la estructura del sistema en estudio, constituida por la relación entre sus componentes bajo cierta forma de organización.

Desde sus orígenes, el pensamiento sistémico ha destacado la importancia de ascender la ética y la sostenibilidad a los primeros niveles de la propia escala de valores, y de promover el hábito de la cooperación sobre la competencia, la integración sobre la autoafirmación, la conservación sobre la expansión, la calidad más que la cantidad, la asociación en lugar de la dominación, la creación de redes en vez de la imposición de jerarquías, el diálogo más que el debate, en fin, el ecocentrismo por encima del antropocentrismo.

Creemos que más que herramientas, los conceptos del pensamiento sistémico y complejo, fronterizos con la cibernética, la teoría del caos y la geometría fractal, son formas distintas de mirar el mundo y de hacer ciencia, recursos esperanzadores ante los extraordinarios retos que demandan con urgencia nuestra atención colectiva, sabiendo que en las decisiones trascendentes que hay que hacer es imperativo preguntarnos: ¿qué planeta les vamos a dejar a nuestros niños? (Jonas, 1990) Y, aún más, ¿a qué niños les vamos a dejar este mundo? (Semprún, 1997). Cuestiones como estas deberán formar parte de la reflexión en la educación básica, media y superior, en la elaboración de política pública y en las discusiones de líderes de opinión.

Los problemas perversos (*wicked problems* en inglés) y la transdisciplina actuarán como ejes articuladores y aglutinantes de las ideas expuestas en este texto,

---

<sup>4</sup> La conferencia “Evolutionary Paths of the Global Economy” se llevó a cabo entre el 9 y el 16 de septiembre de 1987 en el Instituto de Santa Fe, Nuevo México (Anderson et al., 1988). Como resultado de ese evento, se dio origen a la llamada “Complexity Economics”, liderado por W. Brian Arthur, Kenneth J. Arrow y el Instituto Santa Fe, el cual se consolidó como uno de los centros de investigación sobre complejidad más importantes del mundo (Arthur, 2013).

acompañados de una invitación a ampliar la perspectiva intelectual, siempre con el rigor metodológico como centro gravitacional en la búsqueda de la verdad.

## Problemas perversos

Como nosotros ahora, generaciones pasadas quizás han sentido que les ha tocado vivir un momento histórico, en especial retador. No obstante, ahora más que nunca la velocidad de los cambios tecnológicos, políticos y sociales es excesivamente acelerada, lo que implica un gran reto adaptativo para las personas, las organizaciones y la sociedad en su conjunto. Otra peculiaridad de este momento es la estrecha interconexión e interdependencia que existe entre los sistemas de producción, distribución y consumo de bienes y servicios a nivel global. Todo esto, aunado al cambio climático, la sobrepoblación humana, la sobreexplotación de los recursos, la extinción masiva de especies (Kolbert, 2015), la deforestación y la saturación de los sumideros de desechos urbanos e industriales (la tierra, los ríos, los mares y el aire de la atmósfera) con contaminantes diversos han creado situaciones que ponen en riesgo la sostenibilidad del planeta como hábitat para las sociedades y culturas humanas (Wallace-Wells, 2019; Meadows et al., 2004).

Entre los enormes problemas que enfrentamos en este siglo XXI, destacan la insaciable necesidad de energía, la insuficiente disponibilidad de agua potable en muchas regiones, la pobreza con sus múltiples dimensiones y sus crueles derivas (Sen, 1999), la corrupción y su pernicioso efecto en las comunidades más vulnerables, la guerra, la guerrilla y el terrorismo. En el mismo rubro, está el narcotráfico y los efectos funestos que lo acompañan, los desplazamientos masivos y la migración forzada —por hambre o por guerra—, el desamparo de los desplazados y migrantes, la marginación de las masas desposeídas, las deficiencias que asuelan a los habitantes pobres de los países con economías emergentes, las adicciones, la ansiedad, la depresión, la soledad y el envejecimiento de la población en los países económica y tecnológicamente desarrollados. Estos son solo algunos de los grandes y altamente complejos problemas que tenemos que enfrentar. Un tipo especial de dificultades que recibe el nombre de *problemas perversos*.

El término *problemas perversos* (malévolos, tenaces o terribles) fue introducido en 1967 por C. West Churchman en una editorial que publicó en la revista *Management Science* (Churchman, 1967). Churchman se refirió a una clase de problemas gerenciales que se caracterizan por ser formulados necesariamente

6 de manera imprecisa, por existir información incompleta y confusa sobre ellos, porque afectan a un gran número de actores (*stakeholders*) y porque los agentes que deben tomar las decisiones para solucionarlos son numerosos y heterogéneos, y sus valores e intereses muchas veces están en conflicto.

Horst Rittel y Melvin Webber describieron formalmente el concepto en un tratado de 1973, contrastando los problemas perversos o “retorcidos” con problemas domesticados, relativamente “dóciles”, como los que se plantean en matemáticas, ajedrez o resolución de acertijos (Rittel et al., 1973). Estos autores pusieron las bases para confrontar los problemas perversos, insistiendo en la imposibilidad de abordarlos de manera simplista (reduccionista y lineal), como se hizo por muchos años al proponer el crecimiento económico como panacea de todos los problemas sociales, sin prever los efectos secundarios que se generarían en el largo plazo, como el calentamiento global y la contaminación.

Como dice Tom Ritchey:

si usted trabaja con planificación social, comercial u organizativa a largo plazo, o cualquier tipo de planificación de políticas que afecte a las personas, entonces usted maneja problemas perversos. Son esos problemas complejos, siempre cambiantes, difíciles de definir. Son desordenados, ambiguos y reactivos, es decir, se defienden cuando se intenta hacer algo con ellos [traducción propia]. (2011, p. 1)

Los problemas perversos emergen como resultado del comportamiento de sistemas complejos, cuya dinámica está determinada por su estructura. Estos problemas pueden surgir del efecto agregado de las acciones individuales de muchas personas, cada una de las cuales toma decisiones basadas en sus creencias, objetivos y la información disponible sobre una situación.

Uno de los beneficios de este enfoque es comprender que estos problemas afectan múltiples dimensiones humanas, por lo que es necesario contar con colaboración transdisciplinar. Este marco de análisis permite identificar las interdependencias y los ciclos de retroalimentación dentro del sistema. Implica considerar que podrán existir problemas residuales y riesgos de recurrencia, reconocer que cada caso posee circunstancias y contextos únicos, y asumir que las soluciones no serán simples, rápidas, definitivas ni universales. En consecuencia, los problemas perversos requieren enfoques iterativos y adaptativos.

El objetivo principal será ya no resolverlos, lo que generalmente no es posible, sino mejorar la gestión del problema mediante la exploración de estrategias viables. Para ello, se promueve la colaboración entre disciplinas y la participación de actores con perspectivas diversas, con el fin de definir el problema de la mejor manera y encontrar formas de abordaje factibles. Esto evita enfoques fragmentados y, al aceptar la incertidumbre inherente a la complejidad, se fomenta una mentalidad abierta a la búsqueda, la experimentación y el aprendizaje.

## Transdisciplina

En su ensayo, titulado “Las dos culturas”, el físico y literato Charles P. Snow (1959) reflexiona lo siguiente:

Los intelectuales literarios están en un extremo, en el otro, los hombres de ciencia, y como más representativos, los físicos. Entre los dos, un abismo de incomprensión, a veces (en particular entre los jóvenes) hostilidad y anti-patía, pero, sobre todo, falta de comprensión. Cada grupo tiene del otro una imagen curiosamente deformada. (p. 4)

Con esto, C. P. Snow, residente en ambas culturas, apunta las consecuencias dañinas que resultan de esa falta de comunicación, de lo que es muestra pensar que solo es necesaria la tecnología para aliviar los problemas del mundo.

El equipo de editores de *A Vision of Transdisciplinarity* comentan que “el conocimiento, nuestra riqueza invaluable de observaciones y descubrimientos, debe, para seguir siendo valioso, ser permanentemente enriquecido y reorganizado por nuestra historia, nuestras creencias y nuestra cultura” (Darbellay et al., 2008, p. XIX). Por atractivo y razonable que sea este argumento, no siempre se pone en práctica, entre otros motivos, por el profundo cisma existente entre las ciencias naturales y técnicas, por un lado, y las ciencias sociales y las humanidades, por el otro.

La comunidad académica reconoce cada vez más la necesidad de un diálogo más constructivo e innovador entre las dos culturas de Snow y, en general, entre todas las disciplinas, porque ninguna rama del conocimiento es capaz, ella sola, de ofrecer una explicación exhaustiva de los sistemas de alta complejidad y mucho menos de dar soluciones definitivas a los abrumadores problemas de nuestra civilización.

Cuando la naturaleza de una situación problemática está en disputa, como sucede con los problemas perversos, la transdisciplinariedad puede ayudar a determinar cuáles son los asuntos específicos más relevantes y qué preguntas de investigación puntuales deben enfrentarse prioritariamente. Es importante advertir que una síntesis integradora no se alcanza mediante la acumulación de cerebros diferentes. La fusión deberá ocurrir “en el interior de cada uno de los cerebros”, por ello, es necesario orientar la educación superior de manera que posibilite alcanzar ese propósito (Max-Neef, 2005).

Como ejemplos, podemos citar el proyecto Optihouse en Delhi, India, en el que se reunieron expertos en epidemiología, urbanismo, arquitectura y ciencias sociales y medioambientales, así como residentes de la comunidad y ONG locales. Esta colaboración condujo al desarrollo de soluciones de vivienda innovadoras y de bajo costo, ambientalmente sustentables, energéticamente eficientes, promotoras de la salud y culturalmente apropiadas, demostrando cómo el enfoque transdisciplinario puede mejorar las condiciones de vivienda y la calidad de vida en asentamientos de bajos ingresos (Nix et al., 2018).

El enfoque transdisciplinario ha llevado al desarrollo del concepto MEN (*Megawatt*: planificación de las necesidades energéticas, *Ecowatt*: enfoque en la producción de energía limpia y *Negawatt*: énfasis en la eficiencia y la conservación de la energía), que ofrece una visión integral de los sistemas de energía sostenible (Pop et al., 2017). Al combinar estas perspectivas, los investigadores y los profesionales pueden desarrollar estrategias más holísticas y efectivas para la utilización sostenible de la energía.

La investigación transdisciplinaria se ha aplicado para desarrollar soluciones sostenibles de transporte (Axelsson et al., 2020), para el uso del espacio, para la construcción de casas accesibles, para dar servicios de apoyo a los ecosistemas (Albrecht et al., 2020), para orquestar respuestas efectivas ante crisis agudas y muchas más (OCED, 2020).

Organizaciones como el Centre International de Recherches et Etudes Transdisciplinaires (CIRET), domiciliado en Francia; la World Knowledge Dialogue Foundation (WKD), con sede en Suiza, y la Transdisciplinary Research Foundation (TRF) de India, entre otros, tienen como fin el desarrollo y la promoción del enfoque transdisciplinario en comunidades interesadas, tanto científicas como no científicas, y ha facilitado una forma sistémica de abordar desafíos en temas de sostenibilidad, energía, salud, vivienda, uso del suelo, urbanismo y calidad de vida, pero falta mucho por hacerse.

En su *Manifiesto de la Transdisciplina*, Basarab Nicolescu (1996) destaca que “la teoría transdisciplinaria nos hace descubrir la resurrección del sujeto y el comienzo de una nueva etapa en nuestra historia. Los investigadores transdisciplinarios aparecen cada vez más como agentes que encausan la esperanza” (p. 3).

Quizás el optimismo rebosante de Nicolescu, uno de los mayores promotores de la visión transdisciplinaria, sea excesivo, pero ¿de qué otra manera podremos construir un mundo mejor si no es con mucho optimismo, por no decir mucho corazón? Como lo declara la dedicación del manifiesto, “... a todos los hombres y a todas las mujeres que creen todavía, a pesar de todo y contra todo, más allá de todo dogma y de toda ideología, en un proyecto de porvenir” (Nicolescu, 1996, p. 4).

## Pensamiento sistémico

Para dar sentido al mundo, comenzamos por percibirlo a través de nuestros sentidos. Primero, debemos diferenciar aquello que percibimos, es decir, distinguir una cosa de otra mediante la codificación de la información sensorial ordenada en patrones y estructuras significativas.

Una vez realizada esta diferenciación, identificamos —o determinamos la existencia de— relaciones entre los elementos distinguidos. A partir de nuestra percepción del mundo, y mediante diversos mecanismos cognitivos —como la codificación, abstracción, simplificación, integración, identificación de relaciones causales y predicción—, construimos un esquema mental —un patrón organizado de pensamiento que estructura los datos en una representación interna de lo observado—. En el ámbito de la teoría de sistemas, a esta representación simbólica se le denomina *modelo mental*<sup>5</sup>. El conjunto de modelos mentales que vamos coleccionando a través de la experiencia de vivir determina cómo vemos el mundo, interpretamos lo que vemos, nos sentimos ante una situación particular y actuamos respondiendo a cada caso.

---

<sup>5</sup> *Modelo* es una herramienta conceptual que postula un conjunto de relaciones entre conceptos, con el propósito principal de controlar un fenómeno dado del cual se hacen predicciones como función de control. Los *modelos mentales* son representaciones internas de cómo funciona el mundo. Sirven como una explicación simplificada, utilizada para comprender la realidad, resolver problemas y tomar decisiones. Suelen ser imprecisos, incompletos, cambiantes, muchas veces inconsistentes y privados.

Un *sistema* es cualquier entidad compuesta por un conjunto de elementos agregados que interactúan dinámicamente, organizados en función de un propósito común (Ackoff & Emery, 2017 [1972]). *Pensamiento sistémico* es un abordaje general de la investigación científica y filosófica, que se interesa especialmente por el estudio de situaciones complejas que surgen de la interacción e interdependencia entre partes que constituyen una red y se manifiestan como unidad funcional, y como tal se autoorganiza y autogobierna a base de mecanismos de retroalimentación. Los sistemas abiertos<sup>6</sup> mantienen un rico intercambio de información, materia y energía con su entorno. La esencia del pensamiento sistémico deriva de la concepción dinámica de la conectividad entre los componentes de un sistema funcional integrado en una totalidad y de sus relaciones con el contexto (Capra, 1996). En otras palabras, el pensamiento sistémico consiste en comprender que los componentes de un sistema están interconectados, son interdependientes y la interacción coordinada de todos ellos permite alcanzar un propósito colectivo.

Bajo el paradigma sistémico, pensamos el mundo como partes que forman totalidades (*holones*<sup>7</sup>). Las partes, a su vez, son totalidades (subsistemas) compuestas por partes y las totalidades son partes de totalidades aún mayores (suprasistemas).

El pensamiento sistémico comienza con un todo (el sistema elegido), identifica sus partes componentes (mediante el análisis), descubre la relación entre las partes (o la infiere si no es observable) y propone la forma en que, de esa relación organizada entre las partes (la estructura del sistema), surge un comportamiento coherente (identificado a través de la síntesis), el cual depende de todas las partes y se manifiesta en el tiempo como patrones de conducta. El filósofo argentino Mario Bunge (2013) advirtió que

ningún sistema, con excepción del universo, como totalidad, perdura eternamente. Los sistemas se ensamblan, cambian y se descomponen. Si son naturales [deterministas], emergen como resultado de procesos de autoorganización, a

---

<sup>6</sup> Sistema abierto es aquel que interactúa con su entorno, intercambiando materia, energía e información. Todos los seres vivos y las organizaciones que ellos constituyen son necesariamente sistemas abiertos, ya que requieren un influjo continuo de materia y energía para construirse y compensar la entropía que caracteriza a los sistemas disipativos, y requieren información para adaptarse apropiadamente con el fin de persistir en el tiempo.

<sup>7</sup> *Holón* es algo que es un todo tanto como una parte, por lo tanto, cada sistema puede considerarse un holón, ya sea una partícula subatómica o una galaxia.

menudo a partir de los residuos provenientes de la descomposición de otros sistemas. (p. 16)

Las partes de los sistemas pueden ser objetos o personas (sistemas concretos) o conceptos o ideas (sistemas abstractos). Si los componentes son conceptuales, también lo es el sistema; si son concretos o materiales, constituyen un sistema concreto o material. Una teoría es un sistema conceptual; una familia es un sistema concreto perteneciente a la clase de los sistemas sociales. Los sistemas que nos interesan en este espacio son abiertos y contenidos dentro de un límite o frontera que puede ser natural o definida por el investigador. Esta frontera define, en buena medida, los intercambios del sistema con su contexto. La estructura de un sistema es el conjunto de todas las relaciones que mantienen entre sí los componentes del sistema; relaciones dinámicas (cambiantes) sujetas a reglas o principios de organización, cuyo fin es adaptarse a las condiciones del contexto para sobrevivir y seguir alcanzando su propósito como sistema.

A diferencia del pensamiento reduccionista, que se concentra en considerar las partes (análisis), el pensamiento sistémico integra las partes en un todo coherente (síntesis). De la organización coherente entre las partes, derivan propiedades nuevas, no triviales, llamadas propiedades emergentes, que manifiesta el sistema en su conjunto y que es objeto de nuestro interés.

El conocimiento de un sistema incluirá una descripción detallada de (a) sus componentes; (b) las relaciones entre esos componentes, es decir, los procesos realizados en cada una de esas relaciones —variables de estado—; (c) los principios de organización que determinan como serán dichas relaciones —a, b y c componen la estructura del sistema—; (d) los límites del sistema; (e) las relaciones del sistema con su contexto, cada una de las cuales constituye una interfase que es necesario atender —variables de entrada—; (f) las funciones del sistema como totalidad —variables de salida—, y (g) la historia del sistema —su trayectoria—, ya que todo sistema dinámico es lo que es porque ha llegado a serlo, porque es el resultado actual —no definitivo— de las fuerzas, mecanismos y factores que a lo largo del tiempo han hecho del sistema lo que es hoy.

De acuerdo con lo anterior, podemos derivar dos corolarios. Primero, que la situación presente de un sistema (sus variables de estado) lleva implícito su pasado y, al mismo tiempo, condiciona, potencia y acota sus posibilidades futuras. Segundo, que tratándose de sistemas de alta complejidad es imposible conocer todas las

características y funciones que lo definen (desde *a* hasta *g*), por lo que siempre existirá un grado de incertidumbre que no se podrá eliminar.

El pensamiento reduccionista se centra en identificar la causa de cierto efecto observado, la cual tendrá que encontrarse en el estado del fenómeno previo a la aparición del efecto. En cambio, el pensamiento sistémico asume que el devenir de un sistema complejo estará condicionado por siete clases de factores distintos: (1) deterministas: leyes y reglas que dependen de su naturaleza, estructura y condición inicial, lo que comparte con el reduccionismo; (2) contingentes: eventos fortuitos, no esperados ni necesarios, pero posibles que definen circunstancias cambiantes; (3) emergentes: propiedades o comportamientos que surgen de las interacciones entre elementos del sistema); (4) adaptativos: elementos capaces de modificar su comportamiento en respuesta a cambios en el entorno; (5) estocásticos: factores aleatorios o probabilísticos que introducen variabilidad en la evolución del sistema; (6) teleológicos: elementos que responden a objetivos predefinidos o intencionales, y estrategias o decisiones basadas en información, y (7) normativos: reglas, restricciones o principios basados en valores que influyen en la dirección del sistema, como serían los marcos regulatorios o las normas culturales e institucionales.

La combinación de estos componentes genera dinámicas complejas e impredecibles, y comportamiento no lineal<sup>8</sup>, lo que hace que los sistemas de alta complejidad sean difíciles de modelar y gestionar.

## Ciencias de la complejidad

La práctica moderna del trabajo científico tiene sus orígenes en las ideas y la obra de grandes pensadores, entre los que destacan Francis Bacon, Galileo Galilei y René Descartes. En el breve espacio de 27 años (de 1610 a 1637) quedaron sentadas las bases del método experimental en la obra de estos tres “gigantes”: desde el *Sidereus Nuncius* (1610) de Galileo, hasta el *Discours de la Méthode* (1637) de Descartes, pasando por el *Novum Organum* (1620) de Bacon e *Il Saggiatore* (1623), también de Galileo. Las ideas de estos científicos alcanzan la madurez medio siglo después, con la publicación de la obra magna de Isaac Newton, *Philosophiæ*

---

<sup>8</sup> No linealidad es aquella situación en que la magnitud de una causa y su efecto no es proporcional, lo que suele llevar a dinámicas complejas, como sensibilidad exquisita a condiciones iniciales, bifurcaciones, transiciones de fase y otros efectos inesperados.

*Naturalis Principia Mathematica* (1687), donde el matemático inglés describe la ley de la gravitación universal y establece las bases de la mecánica clásica con las leyes homónimas<sup>9</sup>.

La manera de atacar los problemas que nació en el siglo XVII (Revolución Científica) y que hoy llamamos reduccionista, dominó la labor científica por 300 años, siendo extraordinariamente productiva. El reduccionismo, basándose en la lógica positivista de principios del siglo XX, de Rudolf Carnap y Otto Neurath (Carnap & Neurath, 1929), buscó comprender los fenómenos en términos de otros fenómenos más simples y fundamentales para unificar la ciencia (Ney, 2022).

En forma general, el reduccionismo establece que las leyes de todas las ciencias especiales (química, biología, psicología, sociología, antropología, economía, ecología, etcétera) pueden derivarse de la física, con la ayuda de “leyes puente” (Nagel, 1961). Esto requiere del descubrimiento de correlatos físicos de todos los términos que aparecen en las leyes de las ciencias especiales. Términos como “célula”, “soledad”, “dinero” o “consciencia” deben tener sus correlatos físicos para que se puedan formular leyes puente que faciliten la derivación biológica, psicológica, económica o neurológica respectivamente. Algo que no comparte la visión sistémica.

El reduccionismo interpretaba los sistemas complejos como resultado de la suma de sus partes (Kricheldorf, 2016). Con el declive del positivismo lógico hacia la mitad del siglo XX y el auge del realismo científico, el interés de los pensadores se desplazó paulatinamente a la visión desde la complejidad.

Con el beneficio de la perspectiva que dan 400 años de distancia, intentamos fincar el origen de las llamadas ciencias de la complejidad en tres artículos y varios principios generales<sup>10</sup>. Los artículos en que se cimienta la complejidad como labor científica son: *Behavior, Purpose and Teleology* (Rosenblueth et al., 1943), *Science and Complexity* (Weaver, 1949) y *The Architecture of Complexity* (Simon, 1962).

<sup>9</sup> No desconocemos ni olvidamos a Alhazen (965-1040), matemático, físico y astrónomo árabe musulmán. Defensor de la idea de que una hipótesis debe apoyarse en experimentos o en razonamientos matemáticos, por lo que se considera creador del método científico. Fue padre de la óptica moderna, pues contribuyó con la creación de la cámara estenopeica (caja oscura), hizo estudios con espejos curvos y parabólicos, y describió el mecanismo de la percepción visual.

<sup>10</sup> Los trabajos de matemáticos como Henri Poincaré, George Birkhoff, Aleksandr Andronov, Lev Pontrygin, Andrey Kolmogorov, Stephen Smale y David Ruelle en la primera mitad del siglo XX, quienes desarrollaron la teoría de sistemas dinámicos —conocida como teoría de dinámica no lineal o teoría de caos— también contribuyeron al desarrollo de las ciencias de la complejidad.

El artículo de Rosenblueth et al. (1943) fue el germen del que surgió la cibernética. El trabajo de Weaver estuvo influenciado por la metodología llamada investigación de operaciones y por las primeras computadoras. En el mismo año de la publicación de Weaver, Claude Shannon presentaría su trabajo *A Mathematical Theory of Communication* (1948) y, un año después, desarrollaría la teoría de la comunicación en un libro escrito en colaboración con Weaver (Shannon & Weaver, 1949).

Además de la cibernética, la teoría de sistemas dinámicos y la teoría de la comunicación, las ciencias de la complejidad no hubieran sido posibles sin el desarrollo del computador, en el que fueron indispensables los aportes de Alan Turing y John von Neumann, entre otros<sup>11</sup>. En un último salto hacia la complejidad, asistieron la teoría de juegos (Newman & Morgenstern, 1944) y la Teoría General de Sistemas (Bertalanffy, 1968).

Podríamos hacer una lejana analogía (temporal y conceptualmente) entre el momento en que el estudio de la complejidad adquiere legitimación con lo que sucedió en el reduccionismo al publicarse el *Principia* de Newton. En las ciencias de la complejidad, el momento *mirabilis* se dio entre el 9 y el 18 de septiembre de 1987 en el Instituto de Santa Fe, Nuevo México. En esa ocasión, se reunieron diez economistas de primer nivel mundial con diez científicos del instituto dedicados a las ciencias naturales, para realizar un taller de análisis titulado “Evolutionary Paths of the Global Economy”, bajo el patrocinio de John Reed, CEO de Citicorp.

El evento fue dirigido por Philip Anderson y Kenneth Arrow (Premio Nobel de Física 1977 y Premio Nobel de Economía 1972, respectivamente) y moderado por David Pine (físico), codirector del instituto. El propósito del taller fue “explorar la utilidad potencial de un programa de investigación ampliamente transdisciplinar en la dinámica del sistema económico mundial” (Anderson et al., 1988, p. XIII [traducción propia]). En el taller, se trataron temas como teoría de caos, evolución y adaptación, redes complejas, teoría de juegos, impredecibilidad de sistemas complejos, dinámica no lineal, estados alejados del equilibrio, bucles de retroalimentación, bifurcaciones y la íntima relación e interdependencia entre factores psicológicos, sociales, políticos y legales en la determinación del devenir económico. El taller no solo dio lugar al nacimiento de una nueva ciencia económica denominada

---

<sup>11</sup> Podríamos mencionar también a Charles Babbage (1791-1871) y a Ada Lovelace (1815-1852), como precursores relevantes en el desarrollo de la computación, y a Konrad Zuse (1910-1995), como creador de la primera computadora programable en mayo de 1941 en la Alemania nazi.

*Complexity Economics* (Arthur, 2013), sino que fue el banderazo de salida al estudio formal de los sistemas de alta complejidad, utilizando el soporte de modelos de computación (Lewin, 1999).

El 2 de abril de 1999, la revista *Science* incluyó una sección especial dedicada a los sistemas complejos y el 5 de octubre de 2021, el Profesor Göran Hansson, Secretario General de la Academia Sueca de Ciencias, hizo el anuncio de que el Premio Nobel de Física de ese año se otorgaría en dos partes: la primera mitad fue compartida por Syukuro Manabe “por contribuciones innovadoras a nuestra comprensión de sistemas físicos complejos” y Klaus Hasselmann “por el modelado físico del clima de la Tierra, cuantificando la variabilidad y prediciendo de manera confiable el calentamiento global”. Giorgio Parisi recibió la otra mitad del premio “por el descubrimiento de la interacción del desorden y las fluctuaciones en los sistemas físicos desde escalas atómicas hasta planetarias” (The Nobel Prize, 2021). Las ciencias de la complejidad entraron así a “competir en las grandes ligas” con las demás formas de inquisición científica de primer nivel.

¿Qué son las ciencias de la complejidad? Son un campo interdisciplinario centrado en la comprensión de sistemas formados por numerosos componentes interactuantes, que exhiben colectivamente comportamientos emergentes. Propiedades que surgen de estas interacciones, pero que no se pueden predecir ni explicar analizando las partes individuales de forma aislada.

Las ciencias de la complejidad buscan descubrir los procesos, mecanismos y principios que rigen la organización de la materia a partir de sus interacciones en múltiples escalas de orden y creciente complejidad. Comprenden que los sistemas evolucionan a lo largo del tiempo, adaptándose a los cambios en su entorno mediante mecanismos de retroalimentación. Estas leyes no solo ayudan a explicar la emergencia de la organización en los sistemas, sino que permiten anticipar nuevas formas de estructuración y evolución.

Como señala el filósofo James Bohman, la cuestión teórica y metodológica central no es cómo reducir la visión sistémica y la visión analítica a un solo enfoque, sino entender cómo se interconectan y complementan. El debate no gira, entonces, en torno a la fragmentación y reducción, sino a la inclusión y vinculación (*linkage*) (Bohman, 1993). Este desafío es especialmente relevante en el estudio de los sistemas humanos y, en particular, en la comprensión de los problemas complejos y multidimensionales que enfrentamos, aquellos que hemos llamado problemas perversos.

Las ciencias de la complejidad incorporan conceptos de otras ciencias y otras formas investigativas, como la filosofía, la geometría fractal, la teoría del caos y la estadística, dando cobijo a términos como emergencia, causación circular y descendente, bucles de retroalimentación, no linealidad, ley de potencia, autoorganización, adaptación, paisajes de aptitudes, atractores y cuencas de atracción, autopoiesis, dependencia de la trayectoria y otros que son de uso común en el ámbito de la complejidad.

Consideraremos a un sistema complejo si el comportamiento del conjunto de sus componentes (el todo o lo observado desde la visión macro) no puede entenderse examinando las partes separadamente (los procesos locales que ocurren a nivel micro). La interacción entre las partes deberá ser un elemento crítico para generar la manifestación global de interés (Bohman, 1993).

La complejidad es particularmente prevaeciente en biología, medicina (especialmente, epidemiología), psicología, economía, ciencia política, ciencias sociales y ciencias ambientales; disciplinas todas ellas en las que el comportamiento general surge de la interacción entre las partes y entre agregados de las partes. De ello deriva que, en el estudio de la complejidad, las reglas que determinan las interacciones entre las partes son más interesantes que las mismas partes, lo que se traduce en la imposibilidad de lograr una comprensión de ellos por métodos analíticos reduccionistas, basados en el principio cartesiano de aislar las partes de un sistema para facilitar su estudio.

La ciencia de la complejidad emplea una amplia gama de metodologías distintas para estudiar sistemas complejos en diversos dominios. Estos métodos buscan capturar las propiedades no lineales, emergencias y conductas adaptativas de los sistemas complejos. Presentamos aquí una clasificación por categorías como una visión panorámica de los métodos más utilizados.

1. Modelos cualitativos agregados:
  - a. Mapas conceptuales y mapas mentales.
  - b. Diagramas de bucles causales.
  - c. Metodologías de sistemas suaves.
2. Modelos cuantitativos agregados:
  - a. Dinámica de sistemas.
  - b. Nidos bayesianos,
  - c. Sistemas de ecuaciones diferenciales (sistemas dinámicos).

3. Modelos con orientación individual:
  - a. Modelación basados en agentes,
  - b. Análisis de redes sociales,
  - c. Simulación de eventos discretos.

La descripción de cada una de estas metodologías rebasa el propósito de este artículo, por lo que referimos al artículo de Jennifer Bohman, de la Universidad Nacional de Australia, para una primera aproximación. Ahí se describe cada una de las variedades, incluyendo ejemplos, bibliografía específica y los softwares más utilizados para los métodos que lo requieren (Badham, 2010).

## Modelos de simulación

Un *modelo* es una representación formal simplificada de las características y relaciones relevantes del sistema objetivo de interés. Es un sustituto simplificado del sistema original (el sistema objetivo), de sus procesos y de su estructura, definida como el resultado de la interacción entre sus componentes dentro del conjunto de reglas de comportamiento a nivel local, de lo que resulta el comportamiento global (es isomórfico con el sistema objetivo).

Recurrimos a la modelación, buscando entender cómo funciona el mundo, explicar los patrones observados y predecir el comportamiento de los sistemas cuando se hacen cambios en los parámetros relevantes. Los sistemas reales suelen ser demasiado complejos, inaccesibles a la manipulación o tener una evolución demasiado lenta para analizarlos o para hacer experimentos con ellos, por lo tanto, tratamos de formular una representación simplificada del sistema, utilizando ecuaciones o programas de cómputo que podamos manipular y con el que podamos experimentar.

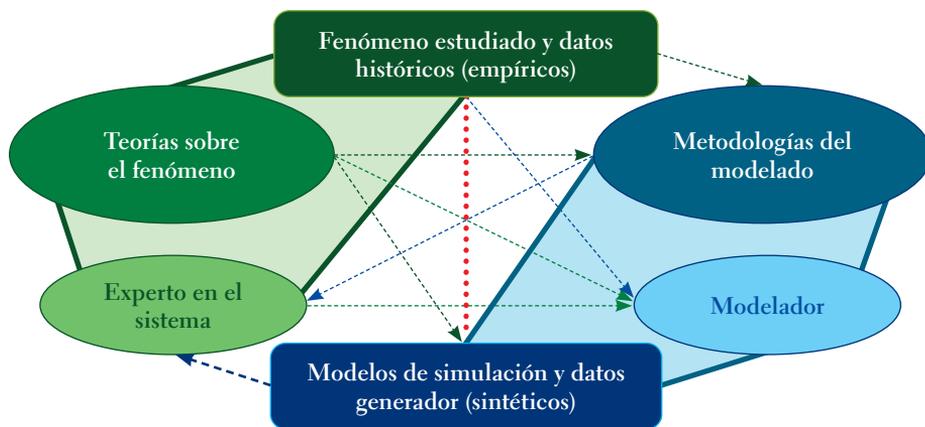
Hay muchas formas de representar un sistema real (una ciudad o una organización, por ejemplo) de forma simplificada. ¿Cómo saber qué aspectos del sistema real debemos incluir en el modelo y cuáles ignorar? El propósito del modelo es decisivo para responder a esta pregunta, puesto que sirve de filtro: se dejan fuera aquellos aspectos del sistema real considerados irrelevantes o poco importantes para responder la pregunta, o se representan de una manera muy simplificada; por ello, solo debe incluirse en el modelo el mínimo de componentes, variables y procesos necesarios para explicar cómo surge el problema que queremos resolver.

La creación del modelo parte de la identificación de un problema o fenómeno que se desea comprender y de los datos históricos (empíricos) de las variables relevantes, lo que es llamado “modo de referencia”. El punto final es la creación de un modelo que tenga la capacidad de generar datos “sintéticos” que se contrastarán con el modo de referencia (flecha roja punteada en la figura 1) y que sean armónicos con los datos empíricos. De este modo, si se logra reproducir en el modelo el comportamiento del modo de referencia, bajo los supuestos aceptados, se habrá demostrado un conjunto de mecanismos y agentes suficientes para explicar el problema observado, aunque no necesariamente sea lo que ocurre en la realidad.

En la figura 1, se han delimitado dos áreas: una en tonos de verde, relacionada con el fenómeno y problema bajo estudio, y la otra en tonos de azul, relacionada con el modelado, el modelador y los modelos. El diagrama representa la sinergia que se desarrolla entre un experto en el fenómeno (el “dueño” del problema bajo estudio), quien conoce las teorías, y el experto modelador, quien conoce las metodologías de modelado y es responsable de describir el sistema y de crear los modelos para ayudar al dueño del problema a comprenderlo y solucionarlo.

Está implícito en el esquema que no se puede hacer un buen modelo de cualquier sistema, o de cualquier problema relevante complejo, si no se tiene amplio conocimiento previo acerca del sistema en el que se presenta el conflicto, como tampoco se puede hacer un buen modelo (aquel que sea útil para el propósito que

Figura 1. Construcción de modelos de simulación



Fuente: elaboración propia.

se ha creado, no el que sea más realista) si no se tiene un sólido conocimiento sobre las técnicas de modelado. Desde el punto de vista matemático, los modelos de simulación creados deberán ser una realización de las teorías que explican el fenómeno (flecha morada quebrada en la figura 1).

Existen muchas técnicas de pensamiento sistémico que se pueden utilizar para comprender, comunicar y pronosticar aspectos particulares de un sistema o de un problema. Cada técnica resalta características específicas y oculta otras. Antes de elegir una técnica, es necesario saber qué se quiere lograr con el modelado y qué aspectos del sistema se quieren destacar. En muchos problemas, puede resultar más útil aplicar varias técnicas diferentes para lograr una comprensión más completa (Miller & Page, 2007; Mitleton et al., 2018).

## Conclusión

Modelar un sistema complejo implica definir un conjunto de relaciones, componentes, procesos y variables delimitadas por una frontera que las separa del contexto. Los elementos del modelo deberán ser capaces de explicar una situación problemática que se manifiesta en una organización o sistema. El segmento de realidad “recortado”, el sistema, adquiere significado por su capacidad de constituir una totalidad con identidad y función propia. Las relaciones y procesos mencionados tienen carácter dinámico y adaptativo a los cambios percibidos en el contexto, realizados para conservar la identidad y las funciones del sistema. Los sistemas complejos pueden verse como un conjunto de acciones alternativas cuya actualización es determinada por dos tipos de fuerzas: (1) fuerzas modeladoras del entorno —restricciones estructurales o contingentes— y (2) fuerzas de los componentes del propio sistema —restricción interna y capacidad de adaptación al entorno.

La reflexión que aquí presentamos busca compartir el lenguaje, los conceptos y los métodos conducentes a adoptar una nueva imagen de la realidad, superando la visión de un mundo que opera como máquina, tiende al equilibrio y es absolutamente determinista. A cambio, se ofrece un mundo dinámico, orgánico, capaz de autoorganizarse, dependiente de su historia y preñado de creatividad. Un mundo en el que todo está relacionado con todo y si queremos cambiarlo, debemos comprender cómo es que hace lo que hace, es decir, debemos primero descubrir cómo se relacionan sus partes para generar el comportamiento observado.

Intuitivamente podemos aceptar que la secuencia quark, partícula, átomo, molécula, célula, organismo multicelular, comunidad de organismos, ecosistema o variantes de ello representan una escala ascendente de complejidad en la que cada estrato o nivel integrado como totalidad (cada holón) constituye uno de los componentes del nivel de organización suprayacente (Bronfenbrenner, 1981).

Cabe aclarar que la esencia de la complejidad no es simplemente su tamaño ni el número de sus componentes, sino el grado o fuerza de interrelación, interdependencia y reciprocidad presente en la interacción entre sus partes. En ausencia de esa interrelación fuerte entre las partes, no hay complejidad.

Los niveles de una jerarquía se pueden distinguir por la *emergencia*, en niveles superiores, de propiedades novedosas que no se manifiestan en los niveles inferiores. La vida y la conciencia son los dos ejemplos más sorprendentes de *emergencia* que podemos imaginar. Una pregunta crítica es si la *emergencia* es simplemente la expresión que va en contra del reduccionismo conceptual (emergencia epistemológica) o si tiene un significado más profundo con una esencia nueva (emergencia ontológica). El surgimiento de la conciencia parece ser uno que se resiste a la comprensión en términos emergentes, puramente conceptuales o epistémicos (Chalmers, 2010).

En un plano pragmático, se ha propuesto que la visión sistémica y las ciencias de la complejidad tienen importancia en el diseño, orientación y potenciación de los esfuerzos que se realizan para impulsar el desarrollo de las regiones menos favorecidas del territorio nacional, al concebir el mundo como un lugar interconectado e interdependiente, en vez de fragmentado o aislado. Por este camino, se destaca cómo unas partes afectan a otras, cómo la trayectoria pasada determina la circunstancia presente y acota las posibilidades futuras, dado que estas se construyen sobre el pasado. En este sentido, podemos advertir que todo sistema y sus componentes coevolucionan con el contexto, por lo que será importante conocer e incorporar las normas culturales, las costumbres, prácticas y valores en cualquier proyecto de estudio o de cambio en las comunidades (Boulton et al., 2015).

No podrá exagerarse la importancia de la sensibilidad de los sistemas (las regiones y comunidades) a particularidades del contexto y a circunstancias políticas, económicas, sociales y medioambientales, lo que deberá formar parte de cualquier descripción, explicación o intervención que se proponga realizar.

Quisiéramos sembrar algunas ideas y cuestionamientos que podrán fertilizar los esfuerzos por mejorar las condiciones de cada territorio, al formular preguntas como las siguientes, basadas en la visión sistémica y de la complejidad:

1. ¿Se han considerado en el proyecto las interconexiones complejas de la comunidad objetivo con comunidades u organizaciones de su contexto?
2. ¿Se ha puesto atención al concepto de dependencia de la trayectoria (la historia previa) al intentar explicar la forma en que se presenta la situación problemática actual?
3. ¿Se ha planteado en las intervenciones propuestas la sensibilidad que existe en la comunidad objetivo a idiosincrasias culturales, circunstancias específicas y al contexto?
4. ¿Son válidas las comparaciones que se están haciendo con otros casos de la literatura?
5. ¿Cómo se muestra empatía con los “propietarios” (*stakeholders*) de la situación problemática?
6. ¿Se ha empoderado a la gente del lugar para que asuma como propio el proyecto de cambio?
7. ¿Es este el momento apropiado para la intervención? ¿Son las condiciones favorables para lograr el cambio de forma eficiente o hay que preparar dichas condiciones?
8. ¿Se han comprendido las fuerzas operantes que determinan las condiciones presentes?
9. ¿Ha sido adecuadamente capacitada la comunidad y surtida de los insumos necesarios para que se pueda introducir la tecnología propuesta a las prácticas y dinámicas de la cultura local?
10. ¿Es posible lograr la consistencia y sostenibilidad necesarias para que sobrevivan y progresen los cambios que se pretende alcanzar?
11. ¿Se han considerado los retrasos entre causa y efecto, la resistencia al cambio en las políticas en uso, en las prácticas institucionalizadas y en las costumbres y expectativas de los interesados?
12. ¿Se han identificado o diseñado los instrumentos apropiados para medir las variables relevantes de la situación actual y de la respuesta a las intervenciones propuestas?

Dado el carácter explicado de los problemas perversos, no se espera que las intervenciones generen respuestas completas ni soluciones definitivas. La adquisición del pensamiento complejo podrá liberar fuerzas creadoras y actitudes críticas que permitan modificar hábitos y cambiar las narrativas derrotistas por unas más esperanzadoras. Tal vez se acepte con mayor naturalidad la necesidad de experimentar

con riesgo de fallar, de aprender, de cambiar el enfoque para descubrir nuevos abordajes, nuevos encuadres, nuevas ilusiones y oportunidades.

Es evidente que la extinción de especies animales y vegetales a escala masiva continuará mientras el hemisferio sur esté agobiado por enormes deudas (económicas, de desarrollo y de justicia social). La escasez de recursos, la degradación ambiental y la expansión demográfica amenazan con ocasionar el desmoronamiento de las comunidades y la violencia étnica y tribal características de la era posterior a la Guerra Fría (Capra, 1996). El extremismo político, las ideologías xenóforas, la inequidad que sufren los marginados en lo económico, en educación, en acceso a servicios de salud y justicia requieren de nuevas formas de pensar y actuar si han de mitigarse sus funestos efectos. Creemos que el pensamiento sistémico y las ciencias de la complejidad y sus metodologías podrían ser un camino esperanzador.

Por último, compartimos una reflexión que hace Rubén G. Prieto en el prólogo del libro *Desarrollo a Escala Humana* de Manfred A. Max-Neff (1993):

Nos encontramos en una encrucijada. Y la perplejidad frente a la realidad en que hemos desembocado luego de décadas de progreso y desarrollo por momentos nos paraliza. [...] Estamos enfrentados al riesgoso momento de la creación. Ineludiblemente debemos interrogar a lo visible o a lo que somos capaces de visualizar, y desde allí hacer visible lo posible, desde sueños que tal vez parezcan imposibles. (p. 17)

## Referencias

Ackoff, R. L., & Emery, F. E. (2017[1972]). *On Purposeful Systems*. Routledge.

Albrecht, C. F., Carlo, J. C., Iulo, L. D., & Buckland, P. D. (2020). International transdisciplinary approach to sustainability research related to place: sustainable, affordable homes and ecosystem services in the US and Brazil. En *Universities and Sustainable Communities: Meeting the Goals of the Agenda 2030* (pp. 187-201). Springer International Publishing.

Anderson, P. W., Arrow, K. J., & Pines, D. (1988). *The Economy as an Evolving Complex System*. CRC Press.

Arthur, B. W. (2013). Complexity Economics: A Different Framework for Economic Thought. *SFI Working Paper*, 213-04-012, 1-22.

Axelsson, R., Ljung, M., Blicharska, M., Frisk, M., Henningsson, M., Mikusinski, G., ... & Angelstam, P. (2020). The Challenge of Transdisciplinary Research: A Case Study of Learning by Evaluation for Sustainable

Transport Infrastructures. *Sustainability*, 12(17), 6995. <https://doi.org/10.3390/su12176995>

Badham, J. (2010). *A compendium of modelling techniques. Integration Insights*. (Integration Insights; No. 12). ANU College of Medicine, Biology & Environment. [http://i2s.anu.edu.au/sites/default/files/integration-insights/integration-insight\\_12.pdf](http://i2s.anu.edu.au/sites/default/files/integration-insights/integration-insight_12.pdf)

Bateson G. (1977). *Steps to an Ecology of Mind*. University of Chicago Press.

Bertalanffy, L. (1968). *General System Theory: Foundations, Development, Applications*. George Braziller.

Bohman, J. (1993). *New Philosophy of Social Science: Problems of Indeterminacy*. The MIT Press.

Boulton, J. G., Allen, P. M., & Bowman, C. (2015). *Embracing Complexity. Strategic Perspectives for an Age of Turbulence*. Oxford University Press.

Bourdieu, P., Chamboredon J. C., & Passeron J. C. (1973), *El oficio del Sociólogo*. Siglo XXI.

Bronfenbrenner, U. (1981). *The Ecology of Human Development*. Harvard University Press.

Bunge, M. A. (2013), *Ontología II. Un Mundo de Sistemas*. Editorial Gedisa.

Capra F. (1996). *The Web of Life. A new Scientific Understanding of Living Systems*. Anchor Books, Random House.

Carnap, R., & Neurath, O. (1929). *La Concepción Científica del Mundo*. El Círculo de Viena. A. Wolf Verlag.

Chalmers, D. J. (2010). *The Character of Consciousness*. Oxford University Press.

Churchman, C. W. (1967). Wicked Problems. *Management Science*, 14(4), B-141–B-146.

Darbellay, F., Cockell, M., Billotte, J., & Waldvogel, F. (2008). *A Vision of Transdisciplinarity. Laying Foundations for a World Knowledge Dialogue*. FL., EPFL Press.

Jonas, H. (1990). *Le Principe de responsabilité: une éthique pour la civilisation technologique*. Les éditions du Cerf.

Kolbert, E. (2015). *La Sexta Extinción. Una Historia Nada Natural*. Paidós.

Kricheldorf, H. R. (2016). *Getting It Right in Science and Medicine: Can Science Progress through Errors? Fallacies and Facts*. Springer International Publishing.

Lewin, R. (1999). *Complexity. Life at the Edge of Chaos*. 2nd Edition. Chicago University Press.

Luhmann, N. (1998). *Sistemas Sociales: Lineamiento para una teoría General*. Anthropos.

Max-Neef, M. A. (2005). Foundations of Transdisciplinarity. *Ecological Economics*, 53(1), 5-16. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2005.01.014>

Meadows, D., Randers, J., & Meadows, D. (2004). *Limits to Growth. The 30-Year Update*. Chelsea Green.

Miller, J. H., & Page, S. E. (2007). *Complex Adaptive Systems. An Introduction to Computational Models of Social Life*. Princeton University Press.

Mitleton-Kelly E., Paraskevas, A., & Day, C. (2018). *Handbook of Research Methods in Complexity Science. Theory and Applications*. Edward Elgar Pub.

Nagel, E. (1961). *The Structure of Science*. Brace & World.

Newman, J., & Morgenstern, O. (1944). *Theory of Games and Economic Behavior*. Princeton University Press.

- Ney, A. (2022). Reductionism. *The Internet Encyclopedia of Philosophy*. <https://iep.utm.edu/red-ism/>
- Nicolescu, B. (1996). *La Transdisciplina. Manifiesto*. Ediciones Du Rocher.
- Nix, E., Paulose, J., Shrubsole, C., Altamirano-Medina, H., Belesova, K., Davies, M., ... & Wilkinson, P. (2018), Participatory Action Research as a Framework for Transdisciplinary Collaboration: A Pilot Study on Healthy, Sustainable, Low-Income Housing in Delhi, India. *Glob Chall*, 13;3(4), 1800054. <https://doi.org/10.1002/gch2.201800054>
- OCED. (2020). *Addressing Societal Challenges Using Transdisciplinary Research*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/0ca0ca45-en>
- Parsons, T (1951). *The Social System*. Routledge.
- Pop, I. G., Văduva, S., & Talpoș, M.-F. (2017). Energetic Sustainability and the Environment: A Transdisciplinary, Economic–Ecological Approach. *Sustainability*, 9(6), 873. <https://doi.org/10.3390/su9060873>
- Prieto, R. (1993). Prólogo a la presente edición. En A. Max-Neff, *Desarrollo a Escala Humana. Conceptos, aplicaciones y algunas reflexiones*. Icaria, Antrazyt.
- Prigogine, I. (1997). *El fin de las Certidumbres*. Taurus.
- Ritchey, T. (2011). *Wicked Problems – Social Messes. Decision Support Modelling with Morphological Analysis*. Springer-Verlag.
- Rittel, H., Webber, W. J., & Melvin, M. (1973). Dilemmas in a General Theory of Planning. *Policy Sciences*, 4, 155-169. <https://doi.org/10.1007/BF01405730>
- Rosenblueth, A., Wiener, N., & Bigelow J. (1943). Behavior, Purpose and Teleology. *Philosophy of Science*, 10(1), 18-24. <https://doi.org/10.1086/286788>
- Semprún, J. (1997). *El abismo se repuebla*. Renaud Miailhe.
- Sen, A. (1999). *Development as Freedom*. Oxford, UK, Oxford University Press.
- Shannon, C. (1948). The Mathematical Theory of Communication. *Bell System Technical Journal*, 27, 623-656. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>
- Shannon, C., & Weaver, W. (1949). *The Mathematical Theory of Communication*. University of Illinois Press.
- Simon, H. (1962). The Architecture of Complexity. *Proceedings of the American Philosophical Society*, 106(6), 467-482.
- Snow, C. P. (1959), *The Two Cultures and the Scientific Revolution*. The Annual Rede Lecture, UK, The Senate House.
- The Nobel Prize. (2021). Prize announcement. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2021/prize-announcement/>
- Wallace-Wells, D. (2019). *El Planeta Inhóspito. La vida después del calentamiento*. Penguin Random House.
- Weaver, W. (1948). Science and Complexity. *American Scientist*, 36(4), 536-544. <http://www.jstor.org/stable/27826254>