

# De los sistemas complejos a la educación

DIÓGENES CAMPOS ROMERO

A partir de las últimas décadas del siglo XX, la ciencia ha profundizado en el estudio de sistemas complejos, cuyas características esenciales se resumen en este artículo. Se sugiere que el sistema de educación es un sistema complejo.

## Introducción

Entre los retos de la Universidad está el de entender los conceptos y visiones del mundo que han surgido de las revoluciones científicas e integrarlos como parte de su cultura. La Universidad debe orientar sus procesos mediante la ayuda de un modelo, pues, como dijo Einstein, “pensar sin disponer de categorías y conceptos es tan imposible como respirar en el vacío” [citado en 1]. Un modelo fundamentado en los conceptos de sistemas complejos podría ser apropiado.

La ciencia ha experimentado diferentes revoluciones, entre otras:

1. Galileo (1564-1642): Incorpora el experimento como criterio de decisión en la ciencia.
2. René Descartes (1596-1650): Fundamenta su método en un conjunto de reglas metodológicas, entre las cuales se encuentran “dividir el problema en partes” (reduccionismo) y “nunca aceptar cualquier cosa como verdad, a no ser que exista conocimiento evidente sobre su veracidad”.

3. Newton (1642-1727): Establece la existencia de una ley natural, la de la gravitación universal, que no diferencia entre los fenómenos terrestres y los fenómenos celestes. A paso seguido se acepta, como un proceso de generalización, que cualquier sistema natural se puede matematizar y que el cálculo es el lenguaje natural para su descripción.



4. Con Edmond Halley (1656-1742), John Couch Adams (un joven de 24 años), Urbain Le Verrier (1811-1877) y Pierre Simon Laplace (1749-1827) se consolida la idea de un universo mecanicista, determinista y predecible.

5. El ambiente mecanicista, según el cual toda realidad natural (incluyendo sistemas biológicos) tenía una estructura semejante a una máquina y podía explicarse mecánicamente, se incorpora en otras disciplinas. En el Siglo XVIII, Adam Smith (1723-1790) introduce la metáfora según la cual una “mano invisible” dirigía los macrointereses y la competencia entre los individuos para resultar en un estado final de equilibrio entre oferta y demanda.

6. Henri Poincaré (1854-1912): Muestra en 1890 que la mecánica newtoniana sigue siendo válida pero que determinismo no implica predictibilidad.

7. Edward N. Lorenz (1917-2008) y Benoit Mandelbrot (1924): Apoyados en un nuevo instrumento (el computador), incorporan en la ciencia los conceptos de atractor extraño, efecto mariposa, geometría fractal. Se encuentra que la geometría de Euclides es insuficiente para describir la naturaleza. El cálculo pierde su exclusividad como lenguaje para la descripción de los fenómenos naturales.

8. En la segunda parte del siglo XX se profundiza en el estudio de sistemas caóticos y sistemas complejos, a los que nos referiremos en lo que sigue.

### Sistemas complejos

El Universo está lleno de sistemas complejos: Físicos, biológicos, sociales, económicos, políticos. Algunos ejemplos son: Las colonias de insectos, el cerebro, el sistema inmunológico, la economía, internet. En estos sistemas, la aproximación reduccionista no aplica.

Un *sistema complejo* es un sistema abierto, formado por un gran número de elementos que interactúan de manera no lineal, que no se puede reducir a dos o más subsistemas distintos, que presenta propiedades emergentes [2, 3]. Estos sistemas comparten características que son comunes, entre otras [4]:

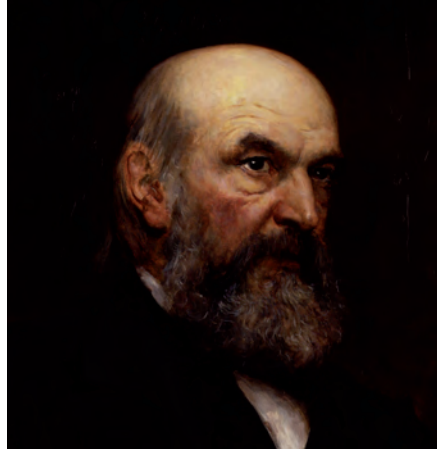
- *Número de elementos que forman el sistema.* (El todo está hecho de partes). Un sistema complejo consta de muchos elementos y a medida que este número aumenta crece la complejidad del sistema. El concepto de *elemento* depende de la naturaleza del sistema objeto de estudio (partículas, moléculas, agentes, comunidades, células, etc.); los elementos pueden tener su propia estructura interna, no necesitan ser idénticos y no tienen funciones estrictamente definidas.

- *Relaciones entre los elementos.* En un sistema complejo existe un gran número de relaciones entre los elementos. Es decir, están conectados por vínculos físicos o funcionales o por una mezcla de ambos.

- *Diversidad de relaciones entre los elementos.* Los elementos están acoplados y se relacionan entre sí de manera no lineal.

- *Medio ambiente del sistema.* Los elementos del sistema están acoplados con el medio ambiente del sistema en la forma de un forzamiento externo que depende por lo general del tiempo. El acoplamiento constituye una manera para que el sistema explore su medio ambiente y adapte su comportamiento para maximizar su capacidad de sobrevivencia. En muchos casos el medio ambiente del sistema puede cambiar con el tiempo.

- *Propiedades colectivas.* (El todo es más que la suma de las partes). El sistema como un todo presenta propiedades colectivas que no están



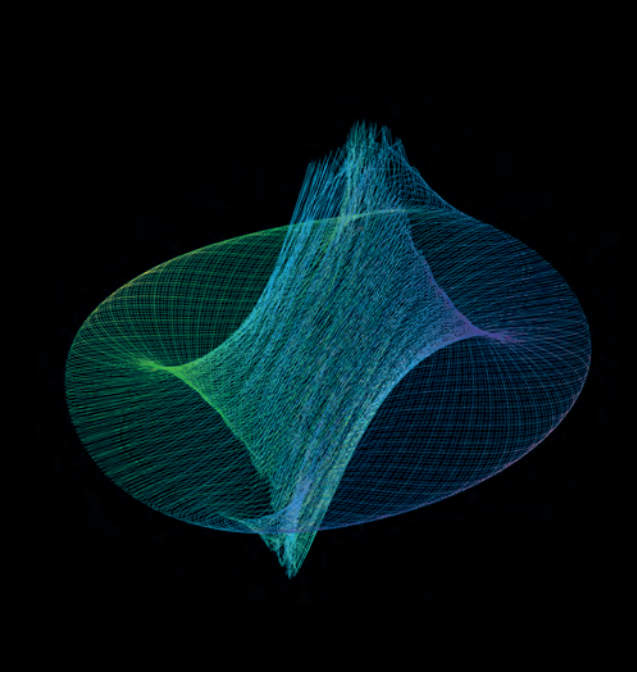
► Pág 82, arriba - Galileo Galilei, retrato de Ottavio Leoni (1578-1630). Wikimedia Commons (Public domain).

Pág 82, medio - René Descartes, retrato de Jan Baptist Weenix (1621-1660). Wikimedia Commons (Public domain).

Pág 82, abajo - Isaac Newton, retrato de Sir Godfrey Kneller (+1723). Wikimedia Commons (Public domain).

Arriba - John Couch Adams, retrato de Sir Hubert von Herkomer (+1914). Wikimedia Commons (Public domain).

Abajo - Benoit Mandelbrot, nacido en 1924. Creative Commons (Attribution 2.0 France).



determinadas exclusivamente por las propiedades de los elementos.

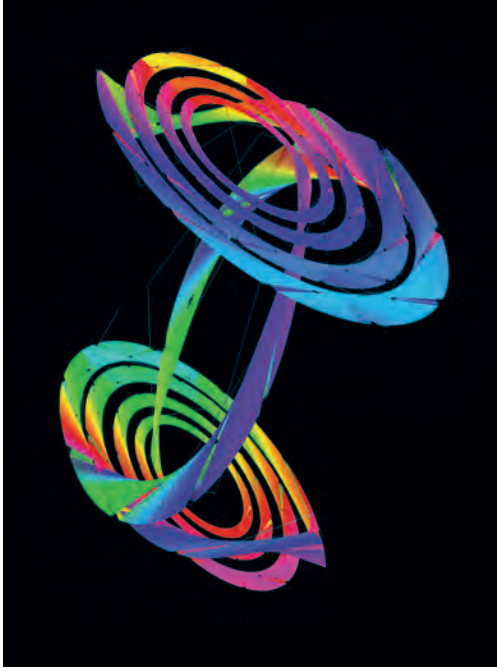
- *Acción recíproca del todo y los elementos.* (Relación recíproca causal entre el todo y los elementos). Las propiedades colectivas del sistema están influenciadas por el comportamiento de los elementos pero éstos, a su vez, se ven influenciados por las propiedades del sistema como un todo.

- *Estabilidad.* (El colectivo puede ser resistente al cambio en las partes). El sistema puede pre-

**La Universidad debe orientar sus procesos mediante la ayuda de un modelo pues, como dijo Einstein, “pensar sin disponer de categorías y conceptos es tan imposible como respirar en el vacío”.**

► La imagen de un mundo determinista y predecible experimenta un cambio radical cuando Poincaré, hacia 1890, estudia la estabilidad del sistema solar aplicando la teoría de Newton de la gravitación universal. Por ejemplo, considérese el problema restringido de tres cuerpos: el Sol, la Tierra y la Luna o el Sol, Júpiter y un cometa. El sistema tiene dos grados de libertad y la energía se conserva, pero se necesitaría una constante de movimiento adicional para que el sistema fuese integrable y para que el determinismo implicara predictibilidad. Como esa constante no existe, excepto para valores excepcionales de los parámetros, el sistema presenta una variedad de comportamientos, regulares y caóticos. El estado de la partícula menos masiva se representa por un punto  $P$  que se especifica mediante cuatro coordenadas que cambian con el tiempo,  $(x, y, p_x, p_y)$  y que, cuando se proyecta en el subespacio  $(x, y, p_x)$  describe una trayectoria como la que se muestra en la figura.

Poincaré encontró las propiedades generales de los “sistemas caóticos” usando la matemática y su creatividad. Hoy en día, los estudiantes y los profesores cuentan además con computadores, el nuevo instrumento de la ciencia, lo que hace posible que estudien estos sistemas con un modesto conocimiento de cálculo y de uso de software. La gráfica se creó usando *Mathematica*, producto de Wolfram Research.



sentar propiedades colectivas que tengan alta estabilidad con respecto a cambios en las propiedades y en el comportamiento de los elementos.

- *Inestabilidad.* (El colectivo puede experimentar cambios súbitos). El sistema puede presentar propiedades colectivas que sean altamente sensitivas a cambios en las propiedades y en el comportamiento de los elementos.

- *Ausencia de un control central.* La interacción (o la interdependencia) entre los elementos del sistema puede dar origen a la aparición de estructuras ordenadas del sistema, aún en la ausencia de planes de acción detallados o de sistemas de organización. Es decir, el orden es consecuencia natural de la evolución del sistema y surge debido a que el sistema dinámico que lo describe es no lineal y presenta atractores (el origen del orden no se debe a un controlador central). Para la aparición del orden sólo se requieren interacciones no lineales entre los elementos del sistema y acoplamientos entre ellos.

► En 1963 Edward Lorenz, con apoyo del recién inventado computador, había encontrado la existencia de un comportamiento caótico en el sistema objeto de estudio. Se sospechaba que el comportamiento caótico de un sistema dinámico no lineal podría ser consecuencia de la integración numérica del sistema de ecuaciones diferenciales. Pero en 1983, Leon O. Chua mostró que ese comportamiento aparecía en sistemas físicos reales, cuando diseñó un circuito electrónico en el que la predicción teórica se confirmaba con la observación experimental. Su dispositivo generaba un atractor caótico, conocido con el nombre de *atractor de doble enrollado*. Como se ilustra en la figura, el atractor se genera cuando el punto  $P$ , con coordenadas  $(x, y, z)$  que cambian con el tiempo, describe una trayectoria que crea el primer enrollado para saltar luego súbitamente y describir el segundo enrollado, se devuelve de nuevo al primero para continuar en este proceso indefinidamente (condiciones ideales). De nuevo, un modesto conocimiento de cálculo y de software permite generar gráficas como ésta, pertinente en un mundo en donde los estudiantes aman lo visual. Gráfica creada usando *Mathematica*, producto de Wolfram Research.

- *Efecto de memoria*. Un sistema complejo típicamente recuerda su evolución por un largo tiempo y es capaz de adaptar su comportamiento a cambios en las condiciones internas y en las condiciones ambientales.

- *Mezcla de orden y aleatoriedad*. Un sistema complejo es típicamente un compuesto de orden y de aleatoriedad, sin que ninguno de los dos predomine. La aleatoriedad está asociada con nuestra incapacidad de predecir el resultado de un proceso, tal como el lanzamiento de una moneda o de un dado.

- *Escalas de tiempo y/o longitud*. Los sistemas complejos exhiben con frecuencia un comportamiento escalable sobre un amplio rango de tiempos y/o longitudes, indicando que una o unas pocas escalas no son suficientes para caracterizar la evolución del sistema.

- *Envejecimiento*. Los sistemas complejos no están en estados estacionarios y con la evolución en el tiempo exhiben propiedades de envejecimiento.

- *La naturaleza del observador*. Lo que es altamente complejo para un observador puede ser menos complejo para otro, razón por la cual en muchos casos se eligen sistemas de referencia “apropiados”. En la descripción del sistema el observador desempeña un papel central.

El sistema de educación que se desarrolla en una universidad es un sistema complejo que está formado por subsistemas que, a su vez, son complejos: los profesores y los estudiantes, por ejemplo. Este subsistema interactúa con el medio ambiente (condiciones internas, ambiente externo) para dar origen a propiedades emergentes.

**DIÓGENES CAMPOS ROMERO** es físico, con una Maestría en Ciencias de la Universidad Nacional de Colombia. La Universidad de Kaiserslautern, Alemania, le otorgó en 1976 el título de *Dr. rer. nat.*, con calificación de excelencia de su Tesis Doctoral en física teórica. Se desempeña como Vicerrector Académico y Decano de la Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería, Universidad Jorge Tadeo Lozano.

## Bibliografía

[1] Auyang, Sunny Y. *Foundations of Complex-System Theories*. Cambridge University Press, (1998).

[2] Richardson K. The hegemony of the physical sciences: an exploration in complexity thinking. *Futures* Vol. 37, Num. 615 (2005).

[3] Ahmed E., Hashish A. H. On modelling the immune system as a complex system. *Theory in Biosciences* Vol. 124, Num. 413 (2006).

[4] Allegrini, P. A., Giuntoli, M., Grigolini, P., West B.J. From knowledge, knowability and the search for objective randomness to a new vision of complexity. *Chaos, Solitons and Fractals* Vol. 20, Num. 11 (2004).