

Metodología de la investigación avanzada: Introducción al estudio de los sistemas complejos y sus aplicaciones

Pablo Argibay

PARTE 1: SISTEMAS DINÁMICOS

Estoy convencido de que las sociedades que enseñen las nuevas ciencias de la complejidad y puedan convertir este conocimiento en productos útiles y nuevas formas de organización social serán un nuevo tipo de supernaciones del futuro.

Heinz Page. The Dreams of Reason: The Computer and the Rise of the Sciences of Complexity

DIGRESIÓN FILOSÓFICA, COGNITIVA Y BIOLÓGICA

Se dice que Protágoras, el sofista, decía: *El hombre es la medida de todas las cosas, de las que son en cuanto que son, de las que no son en cuanto que no son*, traducción más o menos fidedigna del latín *Homo omnium rerum mensura est...* La frase, independientemente de si es cierto su origen en Protágoras, ha sido interpretada de diversas maneras. En general, relacionándola con el relativismo epistemológico y el construccionismo, si se quiere. En nuestros días, con los conocimientos actuales, prefiero darle la siguiente connotación: en tanto somos la resultante de un fenómeno evolutivo y social tenemos restricciones biológicas y culturales, luego cognitivas. Es decir, existe evidencia suficiente como para considerar

que nuestra imagen del mundo tiene ciertas limitaciones biológicas y culturales.

Detengámonos un poco en la formación que les damos a nuestros profesionales médicos. Parecería que el centro de la educación profesional pasa por el entrenamiento en la toma **racional**, es decir consciente y lógica, de decisiones (Fig. 1).

Sin embargo, la conciencia es una recién llegada como fuente de toma de decisiones frente a un problema. Incluso hay quienes creen que es el emergente de la evolución en el cerebro humano (por lo menos), de complejos mecanismos de adaptación. Prácticamente, todos los circuitos neuronales cerebrales se dedican a la toma de decisiones y la acción frente a diferentes estímulos ambientales; sin embargo, solo una pequeña parte de estas decisiones es consciente. Según el conocido psicólogo y neurocientífico cognitivo Michael Gazzaniga, sería una parte del hemisferio izquierdo la que se encargaría de formular hipótesis y justificar acciones que previamente ya habían sido iniciadas en otras partes del cerebro. Incluso a pesar de lo caótico de nuestras percepciones, el cerebro izquierdo se encargaría de “poner” un orden, ficticio, pero evidentemente con ventajas adaptativas (Fig. 2).

En síntesis, gran parte de nuestras concepciones hipotéticas acerca del mundo, provienen de la actividad orde-

Figura 1. Representación esquemática del proceso de toma de decisiones.

El centro de la educación profesional
pasa por la toma racional de
decisiones.

Racionalidad:

- Lógica
- Inferencias diversas
- Evidencia
- Frecuencialismo
- Predictibilidad
- Causalismo



Figura 2. Representación esquemática de la proporción de actividades conscientes versus no conscientes en el cerebro humano.

La conciencia ordenadora



«Una parte del hemisferio izquierdo está relacionada con la tendencia humana de encontrar orden en el caos...» Michael Gazzaniga

nadora y justificadora de nuestro hemisferio izquierdo. Estamos obligados a ver orden y relaciones diversas aun allí donde estas no existen. Claro, la generación de hipótesis plausibles, explicativas y predictoras es la base del pensamiento científico. El problema surge cuando el cerebro, o el cerebro del científico, intenta forzosamente poner orden con determinada herramienta conceptual, también forzada por su cerebro, allí donde esa herramienta da resultados ficticios que fracasan a la hora de explicar y predecir determinados fenómenos, al menos en intervalos interesantes de tiempo. En medicina humana, por ejemplo, pese a los avances, es hoy imposible predecir con un rango aceptable de error la supervivencia o mortalidad de un paciente en determinadas condiciones, sea esta una enfermedad oncológica o su internación en terapia intensiva. Los más exitosos de los índices predictivos o son obvios o fracasan rotundamente. Incluso veremos en este artículo que una de las falacias más grandes del pensamiento médico es la aplicación (supuestamente racional y científica) inapropiada de probabilidades obtenidas en muestras (en general insuficientes), a individuos. De hecho, esta “manía” frecuencialista parecería hallarse “alojada” también en determinadas partes cerebrales, está fijada por la evolución y, por suerte, carecen de ella los niños pequeños, las palomas y algunos otros animales. Esta breve digresión simplemente intentó ser una introducción al porqué de nuestro sistema de creencias acerca del mundo. Sistema de creencias altamente exitoso en el caso de la ciencia, aunque incompleto a la hora de comprender otra clase de fenómenos de interés en ciencia y en todo otro tipo de actividades.

SISTEMAS DINÁMICOS

Se denominan sistemas dinámicos aquellos sistemas cuyo estado evoluciona con el tiempo. Obviamente casi todos los fenómenos de interés en las ciencias pertenecen a esta clase de sistemas. En esta serie de monografías nos referiremos a una clase de sistemas dinámicos que presentan algunas características particulares, con pautas de regularidad colectiva, aunque no sea posible distinguir el comportamiento individual de cada uno de sus componentes. A estos sistemas se les aplica el término sistemas complejos. Sistemas que han sido estudiados en profundidad a partir de la segunda mitad del siglo XX con el advenimiento de las computadoras modernas. Una definición un poco más completa sería: los sistemas complejos son aquellos formados por un gran número (en general) de estructuras simples, que de alguna manera se autoorganizan en un todo capaz de crear (en forma imprevisible) patrones, usar la información disponible en el ambiente y, en el mejor de los casos, evolucionar y aprender. Claro..., el cerebro humano parecería estar en la cima de estos sistemas. Imagine el lector por qué decimos esto.

SISTEMAS DINÁMICOS LINEALES

Se dice que los sistemas dinámicos lineales presentan tres características:

- Homogeneidad
- Aditividad
- Invariabilidad en el tiempo.

Homogeneidad: decimos que un sistema dinámico es homogéneo cuando un cambio en la amplitud de la entrada al sistema produce una variación proporcional a la salida del sistema. Formalmente: si una entrada $X(n)$ produce una salida $Y(n)$, una entrada $kX(n)$ producirá una salida $kY(n)$. Lo mismo aplica para pequeñas modificaciones en las condiciones iniciales del sistema. En los sistemas lineales, estas pequeñas modificaciones no modificarán en grado apreciable la salida del sistema. Veremos que esta condición no se cumple en una serie de sistemas complejos.

Aditividad: un sistema es aditivo cuando la salida del sistema es igual a la suma de las salidas producidas por las diferentes entradas. Formalmente: si $X1(n)$ produce $Y1(n)$ y $X2(n)$ produce $Y2(n)$, entonces $X1(n) + X2(n)$, produce $Y1(n) + Y2(n)$.

Invariabilidad en el tiempo: significa que, si movemos la entrada en el tiempo, producirémos un movimiento idéntico en la salida. Formalmente: si $X(n)$ produce $Y(n)$, entonces $X(n+t)$, producirá $Y(n+t)$, siendo “t” obviamente el tiempo.

Estos sistemas dinámicos lineales son interesantes y en general son bastante bien comprendidos por las metodologías científicas clásicas; sin embargo, en general casi todos los sistemas dinámicos de interés a escala humana carecen de estas propiedades, es decir, son sistemas dinámicos no lineales.

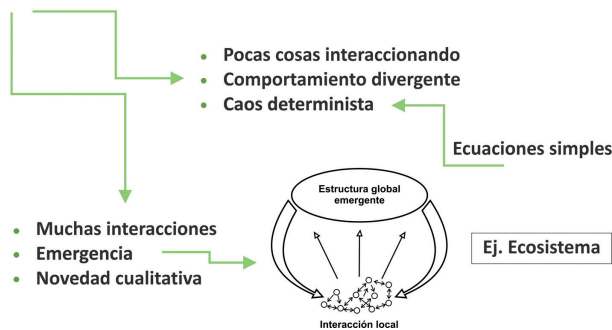
SISTEMAS DINÁMICOS NO LINEALES

Son ejemplo de sistemas dinámicos no lineales los fenómenos climáticos, los sistemas adaptativos en general, las enfermedades, los fenómenos políticos, la evolución de la economía, las ciencias sociales, los efectos de la tecnología, las redes (p. ej., Internet) y el cerebro, entre muchos otros.

Por el momento nos quedaremos con el esquema de la figura 3 que ilustra, a la vez, las propiedades, las consecuencias y la aparición de algunas peculiaridades en estos sistemas. Desde un punto de vista muy general y apropiado para esta etapa de la monografía, los sistemas dinámicos no lineales podrían ser divididos en aquellos en los cuales pocas variables interaccionan, con comportamiento divergente y generando lo que se denomina caos determinista, describible por ecuaciones relativamente simples. Por otra parte, los sistemas dinámicos no lineales que corresponderían propiamente a los sistemas complejos se caracterizan por la interacción de muchas variables, las cuales permiten la emergencia de nuevas propiedades caracterizadas por

Figura 3. Esquema acerca de las propiedades, las consecuencias y la aparición de algunas peculiaridades de los sistemas dinámicos no lineales. Tomado de Lewin R. Complejidad: el caos como generador del orden. Barcelona: Tusquets; 1995.

Sistemas dinámicos no lineales



la presencia de una novedad cualitativa. Por ejemplo, se dice que la mente emerge de la interacción compleja de las diversas partes cerebrales. Veremos más adelante un ejemplo simple de caos determinista en el comportamiento de un péndulo y en los sistemas oscilatorios en general. En el caso de los sistemas complejos, la interacción local de las partes genera la emergencia de una estructura global no explicable por las partes. El ejemplo sería un ecosistema. Nos interesaremos particularmente por los sistemas complejos adaptativos, de interés particular en biología y medicina.

LA VISIÓN REDUCCIONISTA

La visión predominante en ciencia, y por qué no en la visión intuitiva que tenemos del mundo, es la heredada básicamente de René Descartes; para este filósofo cualquier sistema puede ser entendido dividiendo las dificultades que se están examinando en la mayor cantidad de partes posibles. Claramente, el análisis de Descartes plantea que la observación detenida de las partes de un sistema empezando con lo más simple y ascendiendo gradualmente nos llevará inexorablemente hacia el conocimiento de lo más complejo. Esta visión del universo ha tenido tremendo éxito en la ciencia hasta el siglo XX y gran parte de

los logros de la física se han debido a este esquema de pensamiento. Sin embargo, a pesar de los notables éxitos que la visión reduccionista ha tenido, no ha podido dar cuenta de los denominados fenómenos complejos, máxime a escala humana.

CIENCIAS DE LA COMPLEJIDAD

El interés por la comprensión de los fenómenos complejos a través de herramientas no tradicionales tiene sus antecedentes en diversas ciencias que han ido modelándose y convergiendo hacia las denominadas ciencias de la complejidad. La sinérgica, la cibernética y la teoría general de sistemas han sido algunos de los antecesores. En la década de 1980, principalmente el Instituto Santa Fe en Nuevo México, EE.UU., bajo el auspicio del físico premio Nobel Murray Gell-Mann, fundó un centro destinado a desarrollar investigaciones sobre sistemas complejos y altamente interactivos, en un ambiente de estudio fuertemente interdisciplinario.

Podríamos decir que las ciencias de la complejidad tienen como objetivo el estudio de los sistemas no lineales cuyo comportamiento, aunque regular y repetitivo en ciertas condiciones, cambia en forma totalmente imprevista cuando se alteran algunas circunstancias.

En principio, las ciencias de la complejidad resultan de la convergencia de diversas áreas, entre ellas:

- Teoría de la información
- Teoría de la computabilidad
- Dinámicas caóticas
- Evolución.

En síntesis, las ciencias de la complejidad pretenden ser un paradigma superador de la tradición reduccionista, hacia la comprensión de los fenómenos complejos aparentemente irreductibles. En los próximos artículos trataremos de describir las características fundamentales de los sistemas complejos y de los métodos que se utilizan para estudiar su comportamiento, intentando mostrar algunas aplicaciones a sistemas de interés biológico y médico.

Proponemos como trabajo para el lector que reflexione acerca de sistemas complejos que puedan ser de su interés en su ámbito de trabajo o estudio.

BIBLIOGRAFÍA SUGERIDA

- Mitchell M. Complexity: A Guided Tour. Oxford: Oxford University Press; 2009. Introducción.

- Gell-Mann M. El quark y el jaguar. Barcelona: Tusquets; 199?. Metatemas; 38). Introducción.