Metodología de la investigación avanzada: Introducción al estudio de los sistemas complejos y sus aplicaciones Parte IV: El caos determinista

Pablo Argibay

Man, and the animals, and the flower, all live within a strange and forever surging chaos. The chaos which we have got used to, we call a cosmos. The unspeakable inner chaos of which we are composed we call consciousness, and mind, and even civilization. But it is, ultimately, chaos, lit up by visions. Just as the rainbow may or may not light up the storm. And, like the rainbow, the vision perisheth.

D.H. Lawrence

En el capítulo anterior de esta serie de monografías vimos una ecuación simple con conductas bastante interesantes. El "mapa" logístico es una ecuación más que interesante para introducirse en el mundo de los sistemas dinámicos y del denominado "caos determinista". En su modelo más simplificado y con interés en biomedicina, el mapa logístico utiliza una variable "R", que combina las tasas de nacimiento, aparición, duplicación, etc., de un factor (p. ej., célula, población, molécula), con las tasas de mortalidad, desaparición, aclaramiento, etc. Es decir, R es una variable de alguna manera relacionada con el crecimiento o decrecimiento de una variable que evoluciona en el tiempo. Por otra parte, el mapa logístico utiliza otra variable relacionada con el tamaño de la población, denominada "capacidad de carga", "portabilidad" o *fraction of carrying capacity*. Esta variable es sumamente útil y vimos en el capítulo anterior que ha sido interpretada de diversas maneras como "equilibrio de población" o clásicamente como el "número de individuos de una determinada especie que un determinado ambiente puede albergar o soportar sin ser permanentemente alterado" en sus recursos, su equilibrio, etc. "Ambiente" debe ser tomado en una acepción amplia. El ser humano en sí es un ambiente con su correspondiente *carrying capacity.* En cierto modo, la enfermedad es una alteración de esta capacidad, o de la capacidad de sistemas y órganos.

De alguna manera la investigación médica es una búsqueda de modelos, modelos explicativos y predictivos: queremos saber qué mecanismos (en sentido amplio) nos llevan a la enfermedad o al llamado comportamiento normal, de equilibrio, de salud, etc. Explicar y entender los mecanismos, para intervenir sobre ellos en la medida de lo posible. Por otra parte, queremos predecir, saber qué ocurrirá con determinada situación (evolución de una infección, progresión tumoral, aparición de un síntoma, etc.). Predecir para anticiparnos… Vimos también que el concepto dominante en el entrenamiento médico parecería ser el de pensar en términos de mecanismos simples, de relojería, en general con dinámicas lineales. Asimismo, las predicciones que buscamos suelen ser asociaciones más o menos lineales, independientemente de los modelos estadísticos utilizados. Nos encantaría, a partir de una serie de variables, tener una función que nos prediga exactamente qué ocurrirá. Por ejemplo, quisiéramos tener un manual de traducción mediante el cual, dado el estado clínico de un paciente (p. ej., partiendo de tal estadio tumoral), pudiéramos predecir cuál será su supervivencia, olvidándonos de que antes de este estadio y después de él existe una serie inconmensurable de variables que no conocemos o no controlamos, o simplemente dinámicas completamente **sensibles a pequeñas variaciones de las condiciones iniciales**. En este pasaje resaltado "sensibles a pequeñas variaciones de las condiciones iniciales" está sintetizado el presente capítulo. Entender qué quiere decir es entender el caos determinista. "Caos" porque tiene un comportamiento muy similar al azar y nos tienta a tratarlo con herramientas estadísticas apropiadas para fenómenos esencialmente azarosos, como por ejemplo los relacionados con la mecánica cuántica, pero no con fenómenos de otro nivel de complejidad en los cuales no es apropiado equiparar

Recibido: 15/10/12 Aceptado: 19/10/12

Laboratorio de Aprendizaje Biológico y Artificial (LBAL) - Instituto de Ciencias Básicas y Medicina Experimental (ICBME).
Hospital Italiano de Buenos Aires
Correspondencia: pablo.argibay@hospitalitaliano.org.ar

"ignorancia del comportamiento de las variables" con fenómenos probabilísticos. Lo cual no quiere decir que no se puedan o deban utilizar herramientas estadísticas (de hecho se las usa); lo que se quiere decir es que los fenómenos biomédicos no son necesariamente probabilísticos en esencia. Determinista, porque está determinado por las ecuaciones que lo contienen. Una confusión común cuando se habla de fenómenos caóticos es confundir "no predictibilidad" con "no determinación". La "no predictibilidad" es esencial a los fenómenos caóticos; la "no determinación", claramente, no lo es. Si como investigadores conociéramos con una precisión infinita el valor inicial de nuestras variables, estas estarían determinadas por la forma de la función. Aquí reside el problema y no es metodológico sino epistemológico en sí: no podemos conocer con precisión infinita, ni siquiera importante, el valor inicial de nuestras variables; por cuestiones prácticas, sí, ligadas a los aparatos y a nuestros sentidos; pero más por cuestiones ligadas en sí mismas a la "teoría de la medición". Lo anterior en fenómenos lineales no sería un gran problema ya que, en estos, "pequeñas variaciones iniciales conllevan pequeñas variaciones finales". En los fenómenos complejos, sin embargo, "pequeñas variaciones iniciales conllevan notables divergencias en los comportamientos finales del sistema".

Para cerrar esta primera parte, consideraremos otro error frecuente en la concepción de los fenómenos caóticos: la creencia de que su comportamiento solo se debe a nuestro desconocimiento y los fenómenos caóticos solo lo serían en apariencia y la denominación de "caos" terminaría incluyendo fenómenos azarosos o fenómenos de variables ocultas. De esta manera el "caos" no tendría individualidad epistemológica, ni leyes que lo "cobijen". Esto no es así siempre, e incluso parecería que la evolución en la investigación de los fenómenos caóticos nos deja otra concepción:

- Lo que es aparente son algunas conductas aleatorias, conductas que pueden emerger en sistemas deterministas sin una causa externa.
- Esas conductas de algunos sistemas simples y deterministas puede ser imposible de predecir a largo plazo debido a la sensibilidad a las condiciones iniciales.
- A pesar de que la conducta detallada de algunos sistemas caóticos no se puede predecir, existe cierto "orden", evidenciado a través de propiedades universales comunes a diversos sistemas caóticos.

Es decir, el "caos" tiene derecho a una existencia propia en la naturaleza y responde a una serie de leyes o regularidades que agrupan a los fenómenos caóticos.

FENÓMENOS SIMPLES PERO IMPREDECIBLES

Tomaremos un ejemplo más que sencillo adaptado de Moisés Sametband:[1] imaginemos un sistema similar a una ruleta detenida y sin casilleros, es decir un riel por el cual pueda girar una bolita impulsada por nosotros mismos. La longitud del riel es de 10 metros y este tiene un punto F de referencia, marcado sobre él. Supongamos ahora una posición inicial P_0 de la bolita, igual a 1 metro de F. Esta medición está influida por nuestro aparato de medición (una cinta de costurera), que tiene un error E de ± 1 milímetro. De esta manera, nuestra bolita podrá estar en una posición P_0, de 1 metro ± 1 milímetro de F (0.999 a 1.001 metros). Al girar la bolita, cuando pase por F, le daremos un impulso I, que aumentará su posición en 10%. La nueva posición P_1 pasará a estar entre 1.099 y 1.101 metros (el impulso del 10 % multiplicará la posición × 1.1). Repetiremos el proceso en cada vuelta. En la figura 1 se puede apreciar cómo crece la indefinición en cada vuelta, a tal punto que −luego de 97 vueltas− esta se habrá amplificado 10 000 veces y nuestra bolita podrá estar en F ± 10 metros.

Es decir, ¡no existe manera de predecir dónde estará la bolita! El sistema está totalmente determinado por una ecuación bastante simple y experimentable con una calculadora elemental y, sin embargo, es totalmente impredecible. El lector confiado en tener un sistema de precisión más sofisticado que nuestra simple cinta de costurera puede experimentar con condiciones casi increíbles de error, digamos… 1000 o 10 000 veces menor. Verificará por sí mismo que, a menos que cuente con la medida "perfecta", siempre aparecerá la imposibilidad de predecir dónde estará nuestra bolita.

Los sistemas del tipo descripto (resonancias) y similares abundan por doquier en la naturaleza y nos hacen abandonar nuestras pretensiones laplacianas de predictibilidad absoluta.

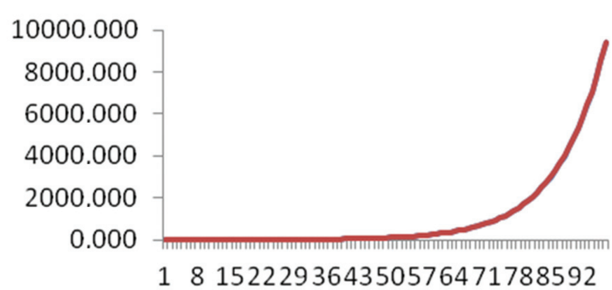

Figura 1. Amplificación de la indefinición a medida que aumentan los períodos y el error en la posición se multiplica por un factor de 1.1.

[1] Sametband MJ. Entre el orden y el caos: la complejidad. México: Fondo de Cultura Económica; 1999.

EL MAPA LOGÍSTICO Y UN MODELITO SIMPLE (Y CAÓTICO) DE INFLAMACIÓN[2]

Volvamos ahora a nuestra ecuación logística:

$$X_{t+1} = R\,X_t\,(1-X_t)$$

En ella, dada una variable X (capacidad de carga) cuyo comportamiento dinámico queremos predecir, tenemos X_t como el valor de X en un momento dado y X_{t+1} , como el valor en una etapa siguiente. Ya dijimos que R combina tasas de aparición y desaparición. Ya habíamos experimentado en el capítulo anterior con valores variables de R entre 2 y 3.5 observando que independientemente del X inicial (X_0), la evolución del sistema convergía a determinadas conductas (Fig. 2).

Es decir, en el ejemplo de la figura 2 vemos que, partiendo de cualquier valor de X menor de 1 (1 significaría el máximo de la capacidad de carga del ambiente), si la variable R se mantiene en un valor cercano a 2, los niveles de X tendrán una leve oscilación en los ciclos iniciales, convergiendo luego a la estabilidad. El modelo "suena" a "homeostasis" y a algunos de los mecanismos biológicos de regulación del cuerpo humano. Imaginemos la acción de una hormona, que podrá oscilar inicialmente, para luego estabilizarse.

Imaginemos ahora que tenemos dos pacientes en su postoperatorio de una cirugía complicada; ambos con determinado nivel inicial de inflamación regulado por una R resultante de la interacción de diversos factores proinflamatorios y antiinflamatorios. Podríamos caracterizar a X_0 como los niveles iniciales de "capacidad de carga" o de "capacidad de inflamación", por decirlo de alguna manera; si se quiere, X podría modelar la respuesta inflamatoria mixta sistémica (MARS). Esta variable oscilará entre 0 y 1, siendo 0 incompatible con la vida (ausencia de capacidad de respuesta) y 1, igualmente incompatible con la vida, ya que se ha llegado al máximo de capacidad de respuesta compatible con la vida. Insistiremos hasta el cansancio en que lo que estamos haciendo es dar un ejemplo médico para explicar un fenómeno dinámico caótico; cualquier parecido con la realidad deberá probarse experimentalmente. Dicho esto, pasemos a experimentar *in silico*:

Arranquemos con dos pacientes que tengan X_0 muy parecidos (dentro de nuestros niveles de capacidad de medición), pero con R diferente (Fig. 3):

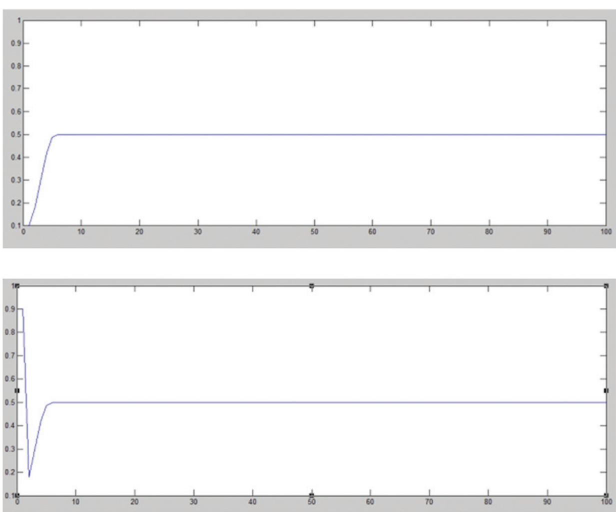

Figura 2. Gráfico del mapa logístico correspondiente a valores de X_0 de 0.1 y 0.9 con una R de 2. Se observa cómo ambas trayectorias, independientemente de sus valores iniciales, convergen (son atraídas) hacia una estabilidad en 0.5. Gráfico obtenido a partir de un programa en MATLAB diseñado por los ingenieros Javier Cúneo y Nicolás Quiroz del LBAL.

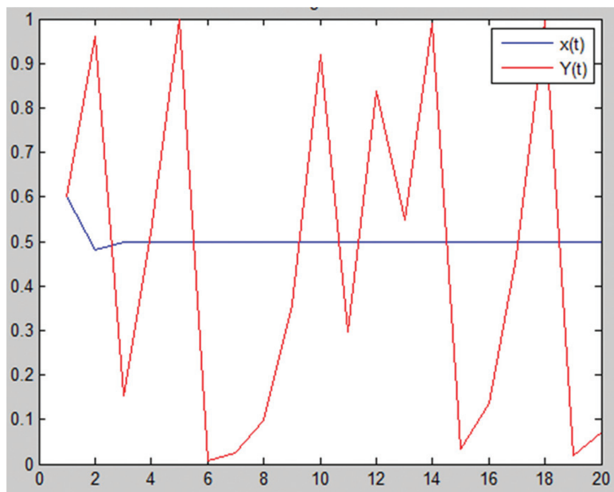

Figura 3. Representación de un sistema dinámico determinado por una ecuación logística y compuesto de dos variables (pacientes), x e y. En ambos casos, su X_0 es de 0.6, con una R para x de 2 y para y de 4.

Como podemos observar, en el caso del paciente x, este luego de una corta evolución estabiliza su "capacidad inflamatoria" en 0.5. Sin embargo, las "características" de y, representadas en la variable R, hacen que evolucione "tórpidamente" con oscilaciones entre la inflamación total y la inmunosupresión. Podríamos decir que, de no conocer exactamente desde dónde partimos (X_0) en y, sería imposible predecir su evolución. Sin embargo, de conocer la variable X_0, y seguir el paciente el determinismo logístico, podríamos predecir su evolución. Pero parecería que "y"

[2] El modelo presentado es una presentación didáctica para entender las dinámicas caóticas y, si bien puede presentar analogías con la inflamación "real", resta demostrar que esta sigue aquellas dinámicas.

es el paciente típico, cuya respuesta es impredecible, si se deja a la evolución natural. Hagamos un experimento más para graficar qué ocurriría en la situación de “sensibilidad a las condiciones iniciales”. Tomemos ahora dos pacientes x e y, ambos con condiciones iniciales X_0 casi idénticas (iguales para la certeza de las mediciones biológicas en general), pero con una R idéntica. El pensamiento lineal nos diría que condiciones iniciales en un nivel de muy pocos decimales de diferencia harían que la evolución de ambos pacientes fuera casi idéntica, o al menos representativa de la variación inicial en X_0 (Fig. 4).

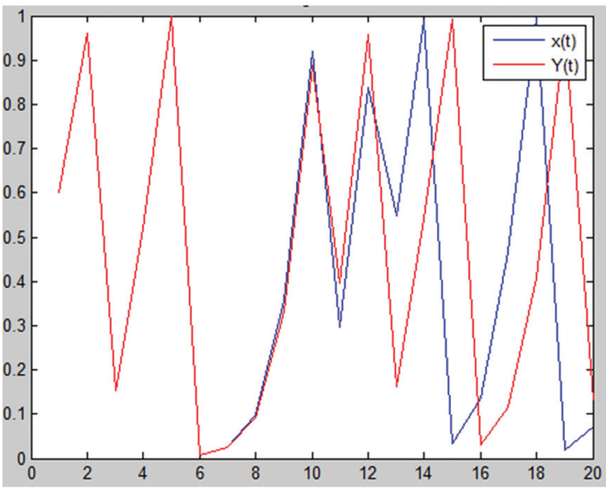

Figura 4. Representación de un sistema dinámico determinado por una ecuación logística y compuesto de dos variables (pacientes), x e y. El X_0 es de 0.6 para el paciente x y de 0.5999 para el paciente y. La R de ambos es de 4.

Como podemos observar, ambos pacientes “arrancan” de una situación casi idéntica (de hecho la sensibilidad del graficador los hace iniciar al mismo nivel). Sin embargo, al cabo de un período de tiempo en el cual se comportan en forma casi idéntica, sus evoluciones se separan. La moraleja es la siguiente: existen sistemas dinámicos que –si bien son determinísticos (determinados por la forma de la ecuación) y causales– son impredecibles en su evolución para niveles iniciales con un grado pequeño casi indetectable de variación. Los ejemplos de estos sistemas en la naturaleza abundan y, de hecho, es factible suponer que muchos de los estados evolutivos de nuestros pacientes siguen esta dinámica o dinámicas similares, que los tornan impredecibles. El modelo laplaciano se torna insuficiente a la hora de “lidiar” con tales sistemas. La ecuación logística es una de las tantas ecuaciones que se “comportan” así; de hecho, es una de las más simples. Es tarea del investigador encontrar el “modelo” que más se ajusta a sus datos. Por otra parte, el médico debería abandonar de alguna manera su afán de predicciones absolutas y dedicarse a observar más detenidamente la evolución de sus pacientes para actuar sobre esta evolución y no sobre predicciones. En el caso de sistemas donde interaccionan gran cantidad de variables, la evolución de los sistemas se hace cada vez más compleja y deberemos centrarnos más en las interacciones, su patrón y la evolución de este, que en predicciones basadas en unas pocas variables. Más adelante veremos que la “teoría de redes” nos puede ayudar en esto.

CONCLUSIÓN

Durante los siglos XVIII y XIX, la concepción mecanicista, de tremendo éxito, impulsó a la física, la química, la biología y dio lugar a nuevas teorías políticas, económicas, sociales y obviamente a la medicina. Esto derivó, aunque no necesariamente debería haber derivado, en una concepción extremadamente lineal y de naturaleza predictiva sin límites para el entendimiento de los fenómenos. Sin embargo, a mediados del siglo XX, el advenimiento de las computadoras y el abordaje de sistemas incluso relativamente simples, sometidos a leyes simples, mostró que pueden tener un comportamiento caótico, no previsible.

BIBLIOGRAFÍA SUGERIDA

- Argibay P. Metodología de la investigación avanzada: Introducción al estudio de los sistemas complejos y sus aplicaciones. Parte III: Dinámicas complejas. Rev. Hosp. Ital. B.Aires 2012;32(3):140-7.
- May RM. Simple mathematical models with very complicated dynamics. Nature. 1976;261(5560):459-67. Nota: May fue uno de los primeros en plantear la enseñanza de los sistemas no lineales en los cursos universitarios. El artículo es relativamente simple, aunque requiere algo de conocimiento matemático.
- Mitchell M. Complexity: a guided tour. Oxford: Oxford University Press; 2011. Nota: Un libro simple, bien de divulgación, actualizado y con poco formalismo.
- Sametband MJ. Entre el orden y el caos: la complejidad. México: Fondo de Cultura Económica; 1999. Nota: Muy claro y principalmente desde la física.
- Strogatz SH. Nonlinear dynamics and chaos. Cambridge, MA: Perseus; 1994. Nota: Para aquellos que teniendo una buena base de álgebra y cálculo se animen a la matemática subyacente en los sistemas dinámicos no lineales. Desaconsejado para aquellos que les “rajan” a las fórmulas.