

COMPLEJIDAD

Para hacer una cosa, antes hay que hacer otra,

CLARA E. GARCÍA BAÑOS

La tesis que se va a sustentar a lo largo del libro es que no hay una diferencia radical entre mundos virtuales y el mundo real, entre objetos libres o con el futuro determinado, entre seres vivos e inertes, entre seres inteligentes y no inteligentes, entre seres conscientes o inconscientes, etcétera. La única diferencia es de grado (Figura 2), habiendo una amplia gama de objetos más o menos reales, más o menos inteligentes y más o menos libres. Y la forma más razonable y posiblemente la única de medir ese grado es usando la complejidad del objeto que estemos analizando.

El estudio de la complejidad es una rama de las matemáticas más bien reciente, pues tradicionalmente la ciencia ha trabajado en los dos extremos de una vasta escala:

- Si hay pocos objetos con pocas interacciones simples y lineales, entonces es relativamente fácil descubrir los comportamientos que se repiten, y ello da lugar a las teorías de la Física, como la mecánica clásica, el electromagnetismo y la relatividad.
- En el otro extremo están los fenómenos en los que intervienen billones de objetos con interacciones simples y lineales. En este caso es imposible saber en detalle qué es lo que hace cada objeto, pero la linealidad de las interacciones permite sacar promedios. Y ello es lo que da lugar a las teorías estadísticas, como la termodinámica y, en cierto modo, la mecánica cuántica.



MENOR - **COMPLEJIDAD** - MAYOR

Figura 2. Desde los sistemas menos reales hasta los más reales: cómic, cuento, película, ciudad. Desde los menos vivos hasta los más vivos: juego, fósil, orquídeas, papagayo. Y desde los menos inteligentes hasta los más inteligentes: herramientas, iguana, delfín, mico, Matías

Pero hay un inmenso territorio entre medias. Si lanzo al aire una piedra describirá una parábola que se puede calcular fácilmente con las ecuaciones de Galileo y Newton. Pero si lanzo al aire un pájaro, la trayectoria que siga es bastante impredecible, aunque al final también llegará a tierra. Incluso algo tan sencillo como la teoría de la gravedad de Newton, dentro de la mecánica clásica, solo es aplicable para interacciones entre dos cuerpos. La teoría no permite predecir en detalle qué va a pasar si hay tres o más cuerpos porque las ecuaciones de Newton no tienen solución analítica en este caso, únicamente se pueden hacer aproximaciones, y los errores se acumulan de forma descontrolada (lo vimos en el capítulo sobre el caos del libro anterior). Algunos de estos sistemas son analizados por las “ciencias de la complejidad” (otra manera de llamar a la “vida artificial”).

Podemos discutir sobre la diferencia entre vida artificial y vida real, inteligencia artificial e inteligencia natural, o entre computación real y computación simulada. Comencemos por la última: si entiendes la equivalencia entre todas las máquinas de Turing universales, entonces sabes que no hay ninguna diferencia. Un computador con un programa escrito en lenguaje máquina ejecuta esencialmente los mismos algoritmos que otro programado en alto nivel compilado, o dentro de un intérprete, o dentro de un simulador, o dentro de una máquina virtual como *VirtualBox OSE*, o dentro de mil máquinas virtuales, una dentro de otra. La única diferencia es la velocidad (e incluso así no se puede medir desde dentro del propio sistema, sino desde el nivel de la simulación anterior), pero el cómputo es el mismo en todos los niveles.

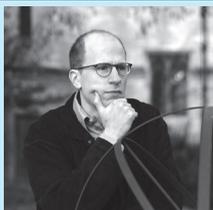
¿Cuál es la diferencia entre la inteligencia real y la simulada? Muchos filósofos tradicionalistas como Searle (1997) establecen que son cosas bastante distintas. Pero te propongo el siguiente juego, para que entiendas que no hay tal diferencia: supón que vas a clase de Cálculo I, y que eres muy malo en esos temas. No entiendes nada. El día del examen se te ocurre una idea salvadora. Dado que no sabes nada de cálculo, lo único que puedes hacer es fingir que sí sabes. De esta manera, finges muy bien y respondes correctamente a todas las preguntas del examen. Has logrado engañar al profesor, fingiendo que sabes, cuando realmente no sabes nada.

Espero haber despertado al menos una sonrisa en este tipo de razonamiento porque, efectivamente, eso no se puede hacer: si logras fingir que sabes cálculo, es porque efectivamente sabes cálculo. Y lo mismo pasa con la inteligencia.

Y lo que se puede decir de los mundos virtuales y el mundo real es lo mismo, o sea, que no hay ninguna diferencia esencial. En este sentido, nuestra querida realidad queda cuestionada. No sabemos si vivimos en una simulación realizada en algún tipo de computador. El filósofo Nick Bostrom (2016) hace un análisis de la cuestión y llega a la conclusión de que lo más probable es que nuestro mundo sea una simulación. Concretamente Bostrom dice que al menos una de las tres siguientes proposiciones tiene que ser verdadera:

- Prácticamente toda civilización que alcance nuestro nivel actual de sofisticación tecnológica, se extinguirá.
- La inmensa mayoría de las civilizaciones que alcancen una tecnología sofisticada no querrán ejecutar simulaciones de su propia historia o variantes de ella.
- Es muy probable que vivamos dentro de una simulación.

El argumento se basa en que si las proposiciones primera y segunda son falsas (lo cual suena muy razonable), entonces habrá un crecimiento exponencial de civilizaciones simuladas que ejecuten simulaciones de otras civilizaciones, que ejecuten simulaciones... Y eso implica que habrá un número enorme de civilizaciones simuladas, frente a un reducido número de civilizaciones reales (solo una). La probabilidad de pertenecer a una simulada es abrumadoramente alta.



Fuente: CC BY-SA 4.0, Future of Humanity Institute (2014). Disponible en: <https://goo.gl/eHhSsh>

Personaje 2

Nick Bostrom (1973-)

Niklas Boström es un filósofo sueco con ideas bastante atrevidas, muy alejadas de la filosofía tradicional. Fue fundador de la organización Humanity+, que busca promover el transhumanismo. En particular recomiendo dos temas que él ha desarrollado: el de que vivimos en una simulación, que acabamos de enunciar. Y el peligro de la Inteligencia Artificial, que se comentará en el capítulo del mismo nombre, que no tiene nada que ver con rebeliones de robots como nos presentan en muchas películas. Las inteligencias artificiales pueden hacernos mucho daño incluso empleadas con las mejores intenciones. En TED hay un video suyo en 2017 explicando estos peligros.

Obviamente es una idea con muchas controversias, entre otras, que no es falsable, es decir, que no se puede hacer ningún experimento para rebatirla. Pero el punto que quiero traer aquí es precisamente ese. No hay forma de distinguir un universo real de uno simulado, para los observadores que vivan dentro.

La otra crítica que quiero hacer aquí a esta argumentación es que, como veremos en un capítulo posterior, los simuladores tienen un tiempo interno que se ejecuta más lentamente que el tiempo externo real, pues para hacer una simulación hay que realizar cálculos que demoran bastante. Los simuladores se usan con dos propósitos: a) recreativos, es decir, para crear escenarios reales o ficticios donde interactuar en tiempo real, pero manteniéndose a salvo de consecuencias desagradables (si mueres en el juego, no mueres en la vida real); y b) investigativos, es decir, para recrear situaciones posibles del mundo real y observar cuáles serán sus resultados. En el primer caso se necesita que el universo simulado vaya igual de rápido que el real. En el segundo caso, se requiere que vaya incluso más rápido. De este modo, si

se avecina una catástrofe, la puedo observar en el universo simulado antes de que ocurra en el real, y puedo ensayar en el universo simulado formas de prevenirla, llevando a la práctica la alternativa que funcione mejor. Una simulación que vaya más lenta que el mundo real no le sirve a nadie, y por eso es que se necesita acelerar el tiempo del universo simulado. La única forma que existe de lograrlo es renunciando a simular los detalles. Así, los algoritmos del mundo simulado son más sencillos y se ejecutan más deprisa, pero a cambio se pierde la complejidad y riqueza que añaden los pequeños detalles del mundo (por ejemplo, simular cómo se va a comportar un gas es muy rápido de hacer si se usa la ecuación de los gases perfectos, pero esa ecuación nada nos dice de la existencia de los átomos).

A lo que quiero llegar es que si hay un simulador dentro de otro y este dentro de otro en un número indefinido de niveles, cada nivel tendrá menos detalles que el anterior, y eso impone un límite práctico a la simulación recursiva de mundos.

Como conclusión, podemos decir que es imposible el escenario que plantea Bostrom. No hay una cantidad exponencialmente grande de mundos simulados. A lo sumo puede haber una cantidad pequeña y finita de mundos simulados respecto al mundo real. ¿Significa eso que estamos en el mundo real? Tampoco. Hay una cierta probabilidad de que estemos en una simulación, pero no es la certidumbre que plantea Bostrom. Lo único que se pretende remarcar en este libro es que no hay forma de diferenciar un mundo real de un mundo simulado. Son equivalentes.



Figura 3. Al aumentar la complejidad aparecen nuevas características en un sistema

Pensemos ahora en qué es lo que hace falta para poder fabricar un universo simulado. Deben existir al menos capacidad de cómputo universal e inteligencia. ¿Cómo lograr estas cosas? A lo largo del libro veremos que es muy fácil, prácticamente inevitable. Resulta que conforme la complejidad de un sistema aumenta emergen nuevas características, tales como la capacidad para calcular, la libertad para tomar decisiones, la capacidad de cómputo universal, la autoorganización (entendida como la capacidad de defender la propia frontera⁶ y fabricar la estructura interna) la posibilidad de sacar copias de sí mismo, la inteligencia y la consciencia (Figura 3). Estas características no tienen por qué surgir exactamente en ese orden pues como argumentaré en los correspondientes capítulos, la inteligencia y la consciencia tienen muchas facetas y algunas pueden aparecer de forma temprana y otras más tarde. Además, puede haber más características que no estén aquí identificadas o incluso que surjan más adelante en la historia del universo.

Todas estas características son graduales, a la vez que pueden intensificarse, emergiendo nuevos matices y relacionarse de forma compleja unas con otras. Por ejemplo, cuando surge la consciencia ello implica un bucle de introspección, que puede mejorar o empeorar la libertad del individuo según predomine la realimentación positiva o la negativa.

De la misma manera, cuanto más inteligente es un agente más se esfuerza por aumentar su propia libertad, pues ello le permitirá acceder a un abanico más amplio de posibilidades, típicamente con el objetivo de sobrevivir. Ello conforma también un bucle de realimentación, en este caso, realimentación positiva. Pensemos, por ejemplo, en el juego del ajedrez. Si no sabes mucho ajedrez, una buena estrategia es aquella que aumenta el número de posiciones alcanzables; y una mala estrategia aquella que las disminuye. La peor jugada posible es en la que entregas tu rey para que lo elimine el adversario, ya que después no tendrás ninguna otra jugada disponible pues has perdido la partida. Y dado que nadie sabe cuál es la mejor jugada para un tablero dado, si aumentas los estados alcanzables es más probable que esa mejor jugada se encuentre allí. Mientras que si disminuyes los estados alcanzables, pierdes libertad, y tu contrincante podría analizar mejor lo que planeas hacer (ya que puedes hacer menos cosas) y encontrar una estrategia contra ti. En la vida real humana pasa lo mismo: aunque no puedas saber en detalle lo que te espera en la vida, estudiar una carrera suele ser una buena decisión porque aumenta tus posibilidades futuras, mientras que caer en una adicción suele ser malo porque disminuye el número de cosas que puedes hacer después. Basándose solo en esto, se ha desarrollado un algoritmo que

6 En la misma línea que la definición de autopoiesis dada por Maturana y Varela en 1973.

juega muy bien cualquier tipo de juego, incluso sin conocer las reglas, y que aprende progresivamente a base simplemente de aumentar sus posibilidades futuras (Wissner-Gross y Freer, 2013).

Pero también, cada una de estas propiedades requiere un mínimo de complejidad para que surjan, que iremos viendo en cada capítulo. Y ello establece una serie de condiciones necesarias, aunque no suficientes. Por ejemplo, si diseñas un sistema con 5 bits de complejidad, podemos estar seguros de que no tiene apenas libertad y definitivamente no le alcanza para tener computación completa. Mucho menos para ser inteligente o consciente.

Vamos a estudiar entonces cómo se puede medir la complejidad de un sistema, cómo se puede generar (podemos adelantar que el mecanismo más importante es la realimentación, que ya la hemos visto en el libro anterior) y, sobre todo, por qué se genera espontáneamente. Con ello se espera dar solución, así sea parcial, a la famosa, filosófica y fundamental pregunta de la ciencia: “¿Por qué hay algo en vez de nada?”⁷.

¿POR QUÉ SE GENERA COMPLEJIDAD DE FORMA ESPONTÁNEA?

La evolución es un mecanismo asombroso para generar complejidad, como sabe cualquiera que haya experimentado con los algoritmos evolutivos que vimos en el libro anterior.

Pero cuando un sistema casi no tiene nada, cuando aún no existe la reproducción (con lo cual la evolución todavía no se ha puesto en marcha), cuando quizás incluso no tenga capacidad de cómputo completa (aunque sí se requiere una cierta capacidad de cómputo), todavía entonces es muy posible que pueda hacer crecer su propia complejidad. Vamos a ver cómo. Para ello primero se dará una breve introducción a varios conceptos matemáticos (¿Qué esperabas? Aunque el sistema no tenga casi nada, las matemáticas siempre están allí). Y después se discutirá cómo ello sirve para generar complejidad.

No sabemos si estas formas de generar complejidad son las únicas, o incluso que sean varios aspectos de un único fenómeno, pero son las que se han identificado hasta ahora. Si las ordenamos de la más simple a la más exigente en requerimientos son:

- **Referencia y autorreferencia.** Un buen libro para aprender más sobre ello es el de Hofstadter (1979). Las autorreferencias (Figura 4) conforman el bucle de realimentación más sencillo, y podemos esperar

⁷ Hay ya muchos investigadores trabajando en ello con excelentes propuestas. Ver, por ejemplo, Atkins (1992) y Krauss (2009).

de ellas que produzcan algún fenómeno complejo. Pero también se comienza a estudiar los aspectos filosóficos de ello, en lo que tiene que ver con las referencias y autorreferencias de la materia (Pattee, 2012).

- **Combinatoria.** Agrupar varios objetos para crear otro más grande. Esto, aunque es trivial, se puede hacer de muchas maneras distintas, por lo que se genera una gran diversidad de nuevos objetos. A su vez, los objetos agrupados interactúan entre sí de varias maneras que se pueden estudiar por medio de la teoría de juegos y suelen crear bucles de realimentación.
- **Realimentación.** Que, a su vez, suele producir:
 - **Fractales.**
 - **Caos.**
 - **Leyes de potencias.**
- **Evolución.** Además, puede emerger la cooperación entre los objetos que evolucionan, y ello es un fenómeno muy potente que genera mucha más complejidad.

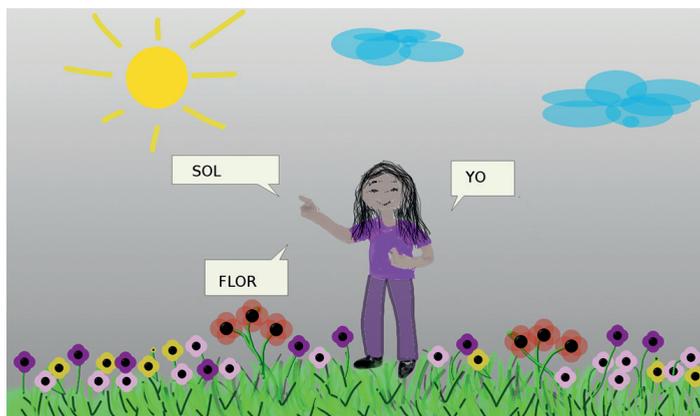


Figura 4. Referencias y autorreferencia en lenguaje hablado

Fuente: dibujo realizado y cedido amablemente por Helga R. Calvo R. (2017)

Vamos a recordar todo ello, aun cuando ya vimos los detalles en el libro anterior.

La referencia es algo tan sencillo como darle nombre a las cosas. En el lenguaje diario empleamos las palabras para referirnos a los objetos (Figura 4). En el computador empleamos los nombres de las variables para referirnos a los datos que contienen. Si pensamos en lo más básico del computador, el código máquina (o, para mayor facilidad, en lenguaje C en la figura 5), cada dato se guarda en una dirección de memoria que equivale a su nombre. De este modo, en una dirección de memoria se puede guardar un dato o

bien otra dirección de memoria que apunte a un dato, y esto último es lo que se llama una referencia o un puntero en lenguajes de alto nivel (no se usa directamente el dato, sino que nos referimos a él por medio de su dirección en memoria) o es un direccionamiento indirecto, en lenguaje ensamblador. También en una dirección de memoria se puede guardar ella misma (en lenguaje C eso sería un puntero apuntando a sí mismo) constituyendo una autorreferencia.

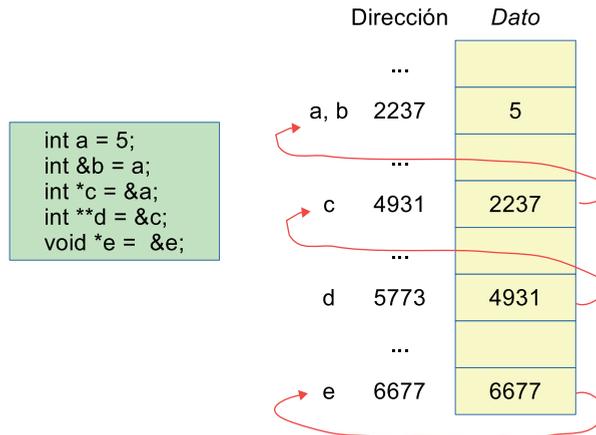


Figura 5. Referencia, puntero, puntero a puntero y puntero a sí mismo, en lenguaje C++ (las direcciones son arbitrarias)

En la figura 6 podemos ver más ejemplos de referencias un tanto insólitas: los avisos de las áreas en los laboratorios universitarios para cumplir con ciertos estándares de calidad, que a su vez nos recuerdan la historia relatada por Oliver Sacks en su libro *Un antropólogo en Marte*, donde visitó a una familia de autistas que tenían etiquetados todos los objetos de la casa.

Las referencias constituyen el paso previo para las autorreferencias, que son las que realmente generan complejidad, bien sea porque construyan recursiones infinitas como un fractal, bien sea porque conduzcan a contradicciones que destruyen el sistema, lo que obliga a crear uno nuevo para poder salir de ellas. Como ejemplo divertido del primer caso, me acuerdo de una carretera cerca de donde vivo que tiene una secuencia de señales de tráfico tradicionales (prohibido aparcar y límites de velocidad), pero la última de ellas es muy original y no está en ningún documento oficial, pues dice “respeten las señales de tráfico”. Supongo que lo lógico es añadir después otra que diga “respeten las señales de tráfico incluido las señales que dicen «respeten las señales de tráfico»”. Y luego otra, y otra, y así hasta el infinito.



Figura 6. Más ejemplos de referencias

Como ejemplo asombroso del segundo caso, recuerdo hace muchos años a mi pareja tratando de imprimir un dibujo por medio de un *software* muy mal hecho. Estaba tan mal hecho que aunque seleccionábamos la opción de imprimirlo horizontalmente, el *software* lo hacía en vertical, desperdiciando parte de la hoja a la vez que se perdían los laterales del dibujo. Después de muchos intentos descubrí, entre los menús enrevesados que tenía, que también se podía especificar esa opción por otro sitio (muy mal *software* porque cada opción debe de estar en un único lugar). Sin embargo, tampoco funcionó. En un momento de inspiración se me ocurrió especificar en un sitio “horizontal” y en el otro sitio “vertical” y ahí ocurrió algo memorable: apareció un letrero de error, regañándome y pidiendo que no me contradijera, a la vez que me preguntaba si lo que quería era imprimir horizontal o verticalmente (definitivamente un *software* pésimo porque tenía una funcionalidad ¡repetida tres veces!). Entonces seleccioné “horizontal” y ahora sí, lo imprimió como queríamos. Desde entonces pienso que las contradicciones profundas pueden ser una forma de aprendizaje, de despertar a la consciencia. El *software* despertó e imprimió correctamente. Y yo desperté y aprendí una nueva forma de aprendizaje. Mucho tiempo después también aprendí que los psicólogos llaman a esto “disonancia cognitiva” y, efectivamente, puede

llevar a las personas a que se replanteen ideas o comportamientos profundamente arraigados, pero erróneos, cuando acumulan demasiadas contradicciones en su contra.

Además, una vez que existen objetos referenciables puedes combinarlos para formar objetos más grandes, que es otra forma de generar complejidad. En el universo en que vivimos, si tienes quarks, electrones y fotones, la combinación de ellos forma átomos estables, cuya combinación forma moléculas, cuya combinación forma células, cuya combinación forma cuerpos, cuya combinación forma sociedades, dicho rápidamente y saltando algunos pasos y matices. Y no todas las combinaciones son posibles pues hay restricciones que lo impiden. Por ejemplo, restricciones geométricas, pues puede haber formas que no encajen. O la valencia de los átomos, que debe de ser compatible para poder formar moléculas. Y precisamente por ello hay complejidad, porque si no hubiera restricciones —si todo fuera posible— no haría falta analizar ni estudiar nada. No solo en nuestro universo sino en cualquier otro universo artificial que diseñemos, la variedad inicial también se dará por combinatoria.

Las realimentaciones producen dependencias. Las variables o los entes que conforman el sistema dejan de ser independientes y se influyen unos a otros. Eso puede producir realimentaciones positivas y caos, por ejemplo, si un pequeño cambio en una variable produce un cambio más grande en esa misma variable. Puede producir fractales si para fabricar una cosa primero hay que fabricar la misma cosa pero en una escala menor. Y esto es una realimentación en el algoritmo de fabricación, lo que se llama recursividad en la jerga computacional. O puede producir leyes de potencia como resultado de la misma realimentación positiva. Por ejemplo, cuanto más grande es una ciudad, más oportunidades ofrece y entonces atrae a más gente, haciéndose la ciudad aún más grande. Las realimentaciones también pueden producir libertad, pues, como Popper demostró, una máquina determinista no puede predecir su propio comportamiento ya que al conocer esa predicción tendría la alternativa de elegir hacer otra cosa distinta. Y, según Mackay, se puede predecir lo que va a hacer una persona o un grupo de personas, pero al revelarles la predicción se corre el riesgo de que reaccionen contra ella. Eso es lo que ocurre cuando se hace una encuesta electoral y se publica el resultado, pues la gente puede modificar su intención de voto. Y ello es imposible de evitar. No se pueden incluir los cálculos de la reacción que ocurrirá al conocerse el resultado. Revelar el pronóstico meteorológico a la gente no hace cambiar el tiempo, pero revelar el pronóstico económico sí hace cambiar la economía, porque el tiempo no depende de la gente, pero la economía sí, y se forma un bucle de realimentación (Barrow, 1999, pp. 338-342).

Los sistemas dinámicos caóticos, los fractales y las leyes de potencia generan mucha complejidad a partir de muy poco. Son procesos creativos. Y están ciertamente relacionados entre sí, pero no son iguales. Ha habido mucha confusión con este tema. En resumen se puede decir que:

- Prácticamente todos los fenómenos caóticos tienen como atractor un fractal. Se sabe que el atractor podría ser también un objeto de infinitas dimensiones, pero aunque sea una posibilidad matemática, no es muy realista. De modo que si hay caos, hay un fractal.
- A su vez los fractales pueden generar complejidad de tres formas: como atractores de sistemas dinámicos, que acabamos de comentar; como algoritmos para la construcción de estructuras espaciales, típicamente en plantas (Prusinkiewicz y Lindenmayer, 2004); o directamente como secuencias temporales, como propone Mandelbrot (2006) usando fractales aleatorios.
- Las leyes de potencias son distribuciones de probabilidad de eventos que no tienen un valor promedio definido y que decaen muy lentamente (lo que se llama “colas gordas de distribución”). Informalmente se dice que modelan sucesos probabilistas donde los eventos más grandes ocurren poco y los más pequeños ocurren mucho. Por otro lado, la relación entre leyes de potencias y fractales está en que ambos son autosimilares.

Conforme la complejidad aumenta, un objeto puede referirse a sí mismo en detalle, en cada una de sus partes, en la forma de construirse. Tenemos entonces el proceso de autocopiado, con lo cual también aparece la evolución, que genera mucha variedad y que habitualmente se percibe como un proceso de adaptación al entorno, lo que los ingenieros llamamos optimización.

Ya tenemos en nuestro sistema referencias, autorreferencias, agrupación combinatoria, realimentaciones y evolución. Pero también pueden producirse fenómenos donde intervengan simultáneamente varias de estas funcionalidades, generando mayores niveles de complejidad. Enseguida presentaré un algoritmo evolutivo generador de complejidad muy general, aunque podría haber otros.

COMPLEJIDAD VERSUS ENTROPÍA

Tenemos mecanismos que generan complejidad, pero ello parece contradecir la segunda ley de la termodinámica, que dice que en un sistema cerrado la entropía nunca disminuye sino que se mantiene o va en aumento, es decir⁸:

$$\frac{dS}{dt} \geq 0 \quad \text{Ec. 1}$$

Es importante entender que esta ley no dice absolutamente nada sobre los sistemas abiertos (que intercambian materia o energía con su exterior). En ellos la entropía puede aumentar o disminuir sin ningún problema.

Esta ley también se formula como que no es posible construir un *perpetuum mobile* de segunda especie, es decir, una máquina que funcione a partir de una única fuente de calor, o sea, que transforme calor en trabajo. En broma se dice que la primera ley de la termodinámica (de la conservación de la energía) expresa que no puedes ganar, mientras que la segunda dice que tampoco puedes empatar.

La entropía (S) tiene varias definiciones: por ejemplo, desde la física se refiere a una medida de lo próximo que está un sistema a un punto de equilibrio; desde la teoría de la información se habla de lo difícil que es predecir una secuencia de símbolos; y hay muchas otras alternativas. La definición de la física clásica se le debe a Boltzman y dice que la entropía de un macroestado depende del número (W) de microestados equivalentes que represente:

$$S = K_B \ln(W) \quad \text{Ec. 2}$$

Siendo K_B la constante de Boltzman.

A nosotros nos sirve entenderla como el grado de desorden de un sistema, aunque no sea una definición completamente exacta. Y, entonces, la segunda ley de la termodinámica dice que el desorden de un sistema cerrado siempre aumenta. Teniendo en cuenta que la vida tiene un componente importante de autoorganización, podría parecer que viola esta segunda ley. Sin embargo, no es así. Pensemos que la primera célula de un animal se va dividiendo y organizando en sus distintos órganos, hasta formar un cuerpo que nace, y que luego sigue creciendo a lo largo de su vida. Todo ello lo hace generando más orden, pero no es un sistema cerrado, pues necesita energía y alimento del exterior.

8 La entropía puede aumentar esporádicamente, pero la probabilidad de que lo haga es muy baja y decrece exponencialmente conforme aumenta el número de partículas involucradas. Por ello, en sistemas macroscópicos la probabilidad de aumento es cero a todos los efectos prácticos.

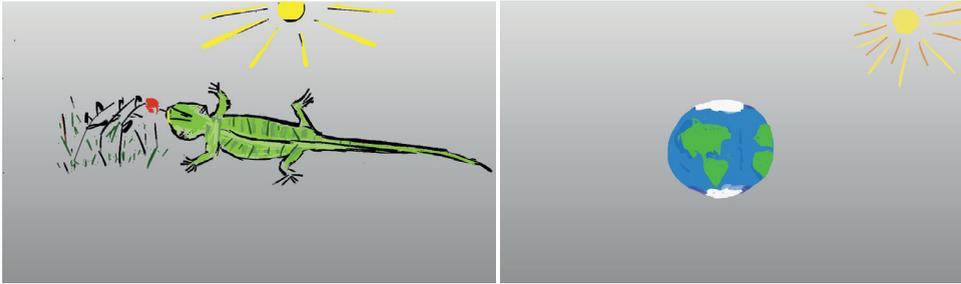


Figura 7. (a) Un lagarto es un sistema abierto, pues recibe comida y calor del exterior; (b) la Tierra con el Sol conforman un sistema razonablemente cerrado

Fuente: dibujos realizados y cedidos amablemente por Helga R. Calvo R. (2017)

Es decir, el ser vivo aumenta su orden (Figura 7-a), pero lo hace a expensas de desordenar considerablemente su entorno. Si luego consideramos todo el sistema ecológico, e incluso todo el planeta Tierra donde crece ese ser vivo, tampoco es un sistema cerrado, pues recibe energía del Sol. Pero si finalmente consideramos el conjunto Tierra+Sol, a efectos prácticos⁹ lo podemos aceptar como un sistema cerrado (Figura 7-b), y en él la cantidad total de desorden que crean los seres vivos durante su existencia compensa y supera el orden que autogeneran para sí mismos, de modo que allí sí se cumple la segunda ley de la termodinámica, como se supone que debe de ser.

Cuanto más desordenado, más entropía tiene. Pero ¿qué significa exactamente “orden” y “desorden”? No hay una respuesta sencilla, pero en los sistemas simples como los constituidos por partículas sin interacciones (gravitatorias, electromagnéticas, ni ninguna otra) hay más orden cuantas más simetrías puedas encontrar: en la figura 8, en (a) no hay simetrías, en (b) hay 8 simetrías (4 formas de rotar la figura para que quede igual más 4 simetrías especulares), y en (c) hay 12 formas (8 rotacionales y 4 especulares).

De hecho, la segunda ley de la termodinámica no es una ley física, sino matemática (de la estadística, concretamente). Se cumple en cualquier sistema, aunque sea construido dentro del computador con leyes físicas distintas. Y lo que viene a decir en su formulación matemática es que hay muchísimas más formas de desordenar un sistema que de ordenarlo, debido a que los sistemas con simetrías son pocos. De modo que si tenemos un sistema con una cierta entropía y lo observamos un tiempo después, lo más probable es que

⁹ Esto es, desde el punto de vista de la Tierra. Porque en realidad no es cerrado en absoluto: la mayor parte de la energía solar se pierde en el espacio, e incluso la Tierra pierde suavemente hidrógeno y helio, y gana diversos materiales que llegan en los meteoritos.

haya hecho una transición hacia un estado de mayor entropía, simplemente porque hay más estados de esos.

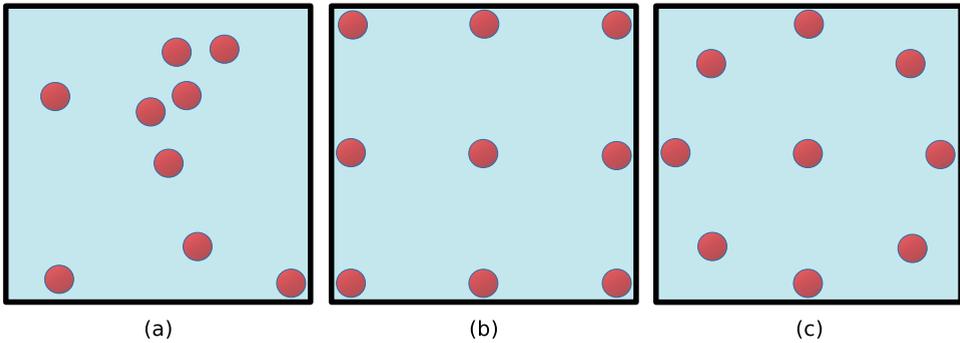


Figura 8. Estados: (a) desordenado; (b) ordenado; (c) muy ordenado

Si vertimos crema blanca en el café oscuro y revolvemos con una cuchara, al final se llegará a una mezcla homogénea de un color marrón claro; ese es un estado de equilibrio termodinámico, de máxima entropía, de máximo desorden. Y, como todo el mundo sabe, no es posible deshacer la mezcla moviendo la cuchara en sentido contrario. No es posible pasar del desorden al orden porque es muy poco probable que ello ocurra espontáneamente. Otro ejemplo que se suele poner es: si tienes una tienda de cerámica y entra un grupo de micos, después de un rato ¿cuál es el estado más probable? Obviamente la respuesta es: mucha cerámica rota por los suelos. ¿Hay alguna esperanza de volver a introducir los micos para que dejen todo como estaba? De nuevo, la respuesta es negativa. Para los físicos, el aumento de la entropía tiene mucho que ver con lo que se llama “la flecha del tiempo”, que siempre se mueve del pasado hacia el futuro.

Otro ejemplo más abstracto: si tenemos una baraja de 36 cartas que está completamente ordenada excepto porque están intercambiadas el 2 y el 3 de diamantes, diremos que tiene una entropía muy baja (un orden muy alto). Y si intercambiamos dos cartas elegidas al azar, la probabilidad de elegir precisamente las dos que están mal es bajísima (concretamente $p_{\text{ORDEN}} = 2 \cdot 1/36 \cdot 1/35 = 0.0016$), mientras que la probabilidad de que el cambio desordene todavía más la baraja es muy alto (concretamente $p_{\text{DESORDEN}} = 1 - p_{\text{ORDEN}} = 0.9984$). Inevitablemente la entropía aumentará conforme hagamos cambios al azar.

Entonces la vida no viola la segunda ley de la termodinámica, pero investigadores como el premio Nobel de Química Ilya Prigogine se han preguntado cómo logra disminuir localmente la entropía aun a costa de aumentarla globalmente en todo el sistema. Prigogine (1990, 1997) ha formulado con-

jeturas como que los sistemas tienden a generar más información (o más estructuras ordenadas) cuanto más lejos del equilibrio están, pero por desgracia eso no se cumple siempre, aunque sí en muchos casos. Conocemos muchas reglas (las llamadas leyes de la física) para, por ejemplo, convertir materia en energía. No obstante, todavía no tenemos una matemática de la autoorganización o, dicho con otras palabras, las reglas que convierten la energía en bits de información y viceversa, aunque ya hay algunos avances pues se ha resuelto una famosa paradoja de la termodinámica que ocurre en un proceso similar a mezclar café con crema.

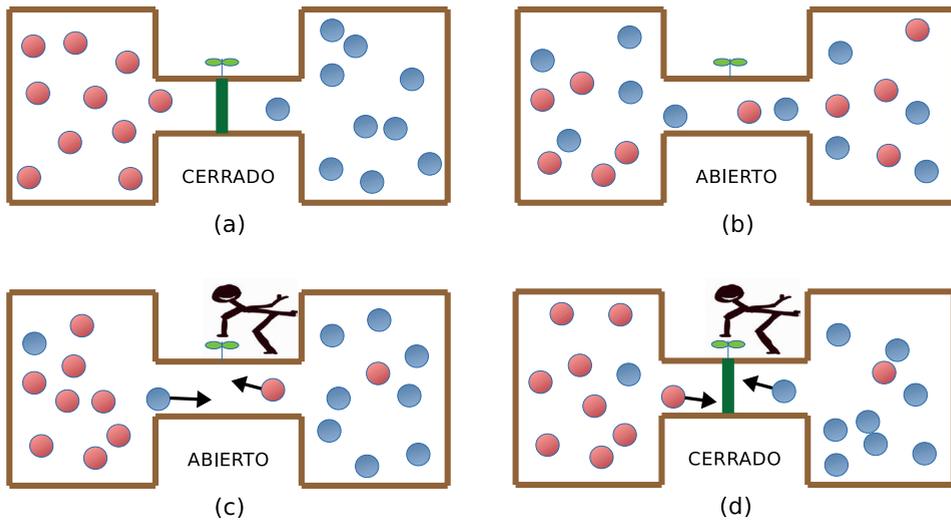


Figura 9. Entropía: (a) inicialmente baja; (b) hasta que se permite la mezcla; (c) el demonio de Maxwell disminuye la entropía al permitir el paso de ciertas moléculas; (d) mientras que impide el paso de otras

Para entender esto pensemos en dos habitaciones, la de la izquierda con un gas caliente, es decir, con moléculas cuya velocidad promedio es alta, y la derecha con el mismo gas pero a menor temperatura, con moléculas más lentas (Figura 9-a). Si abrimos la compuerta que separa ambas habitaciones los dos gases se irán mezclando, y al final la temperatura de ambas habitaciones será la misma, es decir, habremos alcanzado el equilibrio térmico maximizando así la entropía de este sistema (Figura 9-b). Sin embargo, una vez alcanzada esta situación, en 1867 a James Maxwell se le ocurrió que la compuerta se podría abrir y cerrar selectivamente. Concretamente la abriremos si detectamos que viene una molécula rápida desde el lado derecho, o una lenta desde el lado izquierdo, dejándolas pasar (Figura 9-c). En los demás casos la dejaremos cerrada (Figura 9-d). Con este truco podríamos volver a la situación inicial donde las moléculas rápidas están en el lado

izquierdo, sin invertir prácticamente nada de energía en el proceso. Al dispositivo capaz de detectar la velocidad de las moléculas para dejarlas pasar selectivamente se le denominó “demonio de Maxwell”.

Al disminuir la entropía tendríamos disponible energía gratuita. Y esto no puede ocurrir, según las leyes de la termodinámica. La paradoja se resolvió al entender que el demonio de Maxwell requería procesar información para realizar su tarea, concretamente detectar la velocidad de las moléculas que se estaban acercando y tomar decisiones con la compuerta, y se entendió que en los procesos reversibles, donde la cantidad de información permanece constante, la entropía también permanece constante. Solo si se destruye (se borra) la información ocurre aumento de entropía, esto es, en los procesos irreversibles. A partir de esto, Leó Szilárd en 1929 y posteriormente Rolf Landauer y Charles Bennett dedujeron una equivalencia entre información y energía o, más exactamente, entre entropía de la información y entropía termodinámica¹⁰: un bit de información equivale a 2.76×10^{-21} julios de energía. Volviendo al ejemplo de las dos habitaciones, el demonio de Maxwell sí puede separar las moléculas frías de las calientes, pero para hacerlo requiere mucha información, que equivale a una energía que hay que introducir del exterior, compensando la energía que se gana al separar las moléculas. La segunda ley de la termodinámica permanece entonces inviolada. Estos resultados tienen todavía bastante controversia pero también apuntan a que el mundo en que vivimos es computacional.

Desde otra perspectiva, John Barrow (1999) hace una observación muy interesante que logra incluir la información dentro de la Física: para que un sistema complejo pueda operar requiere tiempo, energía e información. Si le falta alguna de esas tres cosas puede compensarlo teniendo mucho de las otras dos. Por ejemplo, si tiene mucha información y tiempo puede crear energía, como vimos que hace el demonio de Maxwell. Si tiene mucha energía y tiempo, puede construir información, por prueba y error, creando sistemas autoorganizados como hace la evolución. Y si tiene mucha energía e

10 Todo esto sigue siendo un área activa de investigación. Por ejemplo, en el artículo “Entropy Production in Ecosystems” de Virgo y Harvey que se puede encontrar en Almeida (2007, p. 123) presentan un modelo minimal donde verificar el principio de máxima producción de entropía, mencionado anteriormente y defendido por Prigogine. Las restricciones en el sistema que presentan (una membrana que concentra un producto químico en su interior) hacen inviable la aparición de ciertos estados, lo que significa que disminuyen la entropía. Allí nos cuentan que la probabilidad de que se forme espontáneamente una bacteria *Escherichia Coli* es de 10^{-21} , lo cual generaría una entropía negativa de 3.2×10^{-12} J/K. La misma entropía se genera si 2.3×10^{-13} kg de agua se calientan de 300K a 301K. Este principio no es ampliamente aceptado pues no siempre funciona, pero modela muy bien las atmósferas de Tierra, Marte y Titán.

información, puede construir tiempo, en el sentido de saltar hacia el futuro, anticipando lo que va a ocurrir. Esto puede parecer confuso pero espero aclararlo con el siguiente ejemplo: si tienes mucho dinero (energía) y mucha información, puedes hacer la apuesta correcta en la bolsa de valores, con lo cual el futuro llega antes, al nivelarse los precios a sus valores correctos de mercado (en el momento en que usas tu información privilegiada para realizar una transacción, se hace pública) y, de paso, hacerte rico. Desde que se logró introducir el concepto de información en el mundo de la Física, ha aparecido una nueva forma de abordar esta última, llamada Física Digital¹¹.

¿CÓMO MEDIR LA COMPLEJIDAD DE UN SISTEMA?

Se puede medir con un único número y así lo vemos en la mayoría de publicaciones. Este número suele ser bits de información: la cantidad de bits que se requieren para describir un objeto, para transmitirlo, para producir los mismos resultados, etc.

Sin embargo, hay sistemas cuya complejidad requiere especificar al menos dos números. Por ejemplo, en el cerebro humano parece que lo importante no es solo su número de neuronas (del orden de 10^{11}) sino también el número típico de conexiones que salen de una neurona (del orden de 10^4). Las neuronas son un tipo de grafo, y en un grafo, efectivamente, hay que especificar el número de nodos y el número de arcos.

En un futuro deberíamos disponer de una teoría de la complejidad que sea capaz de predecir cuántos objetos y qué relaciones entre ellos se requieren para lograr la emergencia de un nuevo nivel de complejidad, así como cuáles son las relaciones requeridas entre esos objetos (en número y calidad). Pero ese momento aún no ha llegado. No parece que baste con uno o dos números para caracterizar la complejidad. Quizás se necesite un vector de números, una matriz u otra estructura de datos más sofisticada para describir la complejidad de un objeto. Es posible incluso que no haya forma de resumirla, que cada sistema complejo sea complejo a su propia manera, que sea único, y que la única forma de modelarlo sea especificando todos sus bucles de realimentación positivos y negativos. O quizás algún formalismo matemático no inventado aún. Pero de momento, como queda dicho, se mide con un único número, en bits.

11 *Digital Physics*.

Y ¿qué es un bit? Es la cantidad básica¹² de información. Su descubrimiento o definición se lo debemos a Claude Shannon (1948), que podemos ver, en términos sencillos en el recuadro 1.

Recuadro 1: Definición de bit

Un bit de información es una pregunta cuya respuesta es de tipo “sí” o “no” con ambas respuestas equiprobables.

Por ejemplo, si elegimos dos personas al azar en la calle y nos preguntamos “¿la primera persona lleva más monedas que la segunda?”, entonces la respuesta a esa pregunta conlleva un bit de información. Si averiguo la respuesta, sabré un poquito más acerca del mundo en que vivimos, concretamente tendré 1 bit más de información.

Un ejemplo incorrecto: tengo una nueva vecina y quisiera saber si sabe bailar salsa. La respuesta es “sí” o “no”, por lo que parecería que al hacer la pregunta voy a obtener un bit de información, pero se me olvidaba decir que estoy en la ciudad de Cali, donde casi todo el mundo practica este baile. Es mucho más probable que me diga “sí”, por lo que obtengo menos de un bit de información.

Vamos a dar una definición formal y general de bit. Para ello pensemos que va a ocurrir un evento X con n posibles resultados $\{r_1, r_2, \dots, r_n\}$ y sé que la probabilidad de obtener cada resultado es, respectivamente, $\{p_1, p_2, \dots, p_n\}$. Si espero a que ocurra el evento y averiguo el resultado, la información H que voy a obtener de ese evento X es:

$$H(X) = \sum_{i=1}^n p_i * \log_2 \left(\frac{1}{p_i} \right) \quad \text{Ec. 3}$$

También se llama cantidad de información o entropía del evento X , y sus unidades son bits. Es una medida de la dispersión de la probabilidad $p(x_i)$: cuando hay mucha dispersión, obtengo mucha información cuando ocurre el evento. Y viceversa.

En el primer ejemplo de las monedas, como no tenemos ninguna pista acerca del resultado, las dos respuestas son equiprobables y entonces $p_1=p_2=1/2$, por lo que $H=1/2*\log_2(2)+1/2*\log_2(2) = 1 \text{ bit}$.

En el segundo ejemplo, si el 80% de l@s caleñ@s bailan salsa, entonces $p_1=80\%$ y $p_2=20\%$, por lo que la cantidad de información que obtendré al saber la respuesta es $H=80/100*\log_2(100/80)+20/100*\log_2(100/20) = 0.72 \text{ bits}$.

¹² No es la cantidad mínima porque puede haber fracciones de bit, como veremos en el problema 1.



Problema 1: Las doce monedas

Tenemos 12 monedas iguales, salvo que una de ellas es falsa. Y se sabe que es falsa porque pesa distinto que las demás (quizás pese más o quizás pese menos). Tenemos también una balanza de dos platillos, de esas antiguas, que indica únicamente cuál platillo pesa más o si ambos pesan igual. Usando la balanza solo tres veces, averigua cuál es la moneda falsa y di si pesa más o pesa menos que las otras.

Pista: la pregunta que hagas (forma de pesar) debe dar resultados equiprobables.

Esto significa que si tenemos un evento cuyo resultado es conocido con muy alta probabilidad, la información que nos aportará cuando ocurra es muy pequeña. Mientras que si todos los resultados son igual de probables entonces tendremos la máxima incertidumbre, de modo que cuando ocurra el suceso obtendremos la máxima información posible.

Un tercer ejemplo podría ser: en un aula de clase, pedir a alguien que piense en uno de los objetos que allí hay (tablero, proyector, computador, equipo de sonido, aire acondicionado, mesa del profesor, silla del profesor, puerta). Se trata de adivinar cuál objeto es, haciendo preguntas cuya respuesta sea sí o no, usando el menor número de preguntas posible. Para ello, la mejor estrategia es hacer preguntas cuya respuesta sea equiprobable. Por ejemplo, preguntar si el objeto está atornillado a la pared no es una buena idea, porque la respuesta “sí” se obtendrá solo si es el tablero, de modo que su probabilidad es $\frac{1}{8}$ frente a $\frac{7}{8}$ para el “no”. En estos casos lo más adecuado es diseñar un árbol binario de preguntas como el de la figura 10. Dado que hay 8 objetos, se requieren $\log_2(8) = 3$ bits, es decir, 3 niveles de preguntas con respuesta binaria equiprobable, para codificarlos.

En Internet hay juegos que te proponen pensar en un objeto cualquiera de este mundo (20Qnet, 2017), y el *software* lo adivina haciéndote 30 o menos preguntas. Eso significa que el *software* dispone de un árbol binario con 2^{30} , es decir, aproximadamente mil millones de objetos. Es bastante razonable. Con seguridad que lo agotador fue colocar todos estos objetos en el árbol binario del *software*.

La definición de bit de Shannon es la más sencilla que cumple con cuatro propiedades interesantes, que se pueden encontrar en DeDeo (2018): continuidad, simetría, condición de máxima entropía y condición de grano

grueso. Pero no es la única. Hay más de cien definiciones alternativas. Una de las últimas se puede ver en Tsallis (2000).

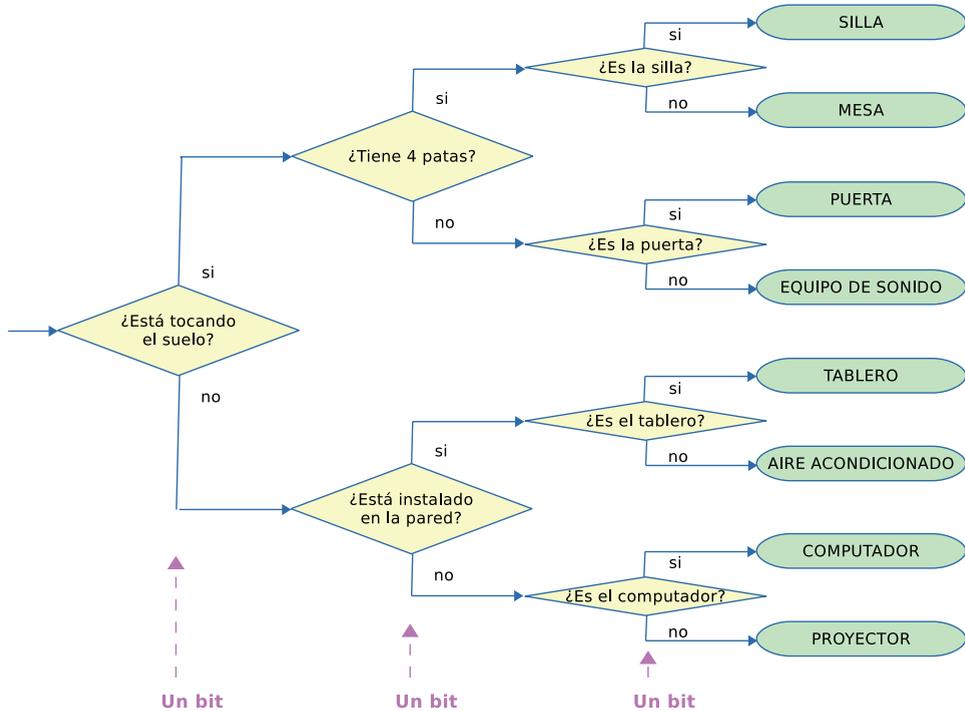


Figura 10. Árbol de preguntas

Las preguntas que debemos hacer para averiguar lo complejo que es un sistema pueden estar orientadas de diversas maneras:

- Medir la **cantidad de información** que describe el objeto haciendo preguntas binarias, como vimos un poco más arriba.
- Medir la **complejidad descriptiva** del objeto, primero escribiendo en español¹³ su descripción. Después se pasa la descripción a una cadena binaria y por último se escribe el programa de computador más corto que imprima esa cadena. La longitud del programa, medida en bits, es la complejidad descriptiva del objeto, y también se llama **complejidad de Kolmogorof-Chaitin** o **información algorítmica**¹⁴ (Chaitin, 1992 y 1997).

13 Para ser exactos, debería usarse un lenguaje formal en vez del español. Pero si las cosas se hacen bien, sin ambigüedades, la diferencia es solo una constante.

14 Dependiendo del libro consultado, estas definiciones de complejidad podrían no ser equivalentes. La idea general es la misma pero podrían diferir en pequeños matices.

- Simular el comportamiento del objeto, usando un programa de computador, y después calcular la **complejidad computacional** (temporal o espacial) de ese programa.
- Medir la **organización interna** del objeto. Se pueden usar medidas termodinámicas (promedios), medidas de caos (el coeficiente de Lyapunov de sensibilidad a errores) o medidas fractales (la dimensión de Hausdorff o el espectro multifractal).
- Medir la **resistencia al cambio** del objeto. Por ejemplo, en un grafo, ¿cuántos arcos escogidos al azar hay que eliminar para que las propiedades del grafo cambien significativamente?
- Hay muchas **otras** medidas de complejidad que no se hacen desde una perspectiva de información, sino combinatoria (Poincaré), como incompletitud (Gödel), como indecidibilidad (Turing), desde la topología (Smale), desde la teoría del caos (Lorenz y Ruelle), como termodinámica del no equilibrio (Prigogine), como geometría fractal (Mandelbrot) o desde la teoría de las catástrofes (Thom).

En todos estos casos hay un problema: no es posible saber si hemos logrado la caracterización más corta posible del objeto. Por ejemplo, si tenemos una descripción de un mecanismo de engranajes que, traducido a binario es:

010001000100010001000100010001000100010001000100010001000100

Quizás el programa más corto que lo imprima sea:

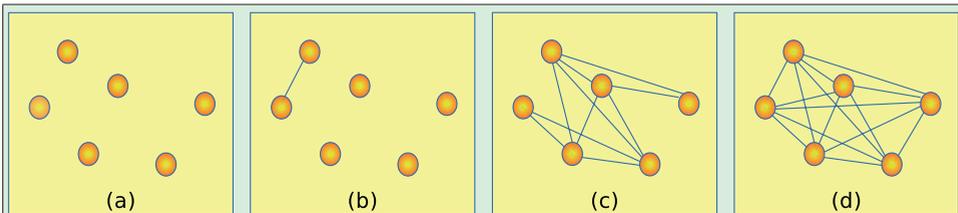
```
print "010001000100010001000100010001000100010001000100010001000100"
```

Que tiene 56 letras (392 bits en código ASCII de 7 bits).

O, si nos damos cuenta que hay regularidades, entonces podríamos escribir:

```
12.times { print "0100" }
```

Que tiene 25 letras, por lo que su complejidad es menor que lo que pensábamos inicialmente (175 bits en ASCII).



Problema 2: ¿Cuál es el sistema más complejo?

Tengo a mi cargo varias salas de computadores (representados por los círculos) y que están interconectados en redes diversas (las conexiones son las líneas).

Atendiendo a las conexiones, ¿cuál es la sala de cómputo más compleja?

¿Habrá algún programa más corto que imprima lo mismo? En Chaitin (1999) se demuestra que no es posible saberlo. Es lo que los matemáticos llaman un indecidible. En vez de poner la demostración formal, lo podemos ver con algunos ejemplos (Problema 3).

Problema 3: Algoritmo descriptor

¿Cuál es la regla de formación de cada una de las siguientes secuencias de números?

- 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19
- 1, 4, 1, 5, 9, 2, 6, 5, 3, 5
- 0, 5, 4, 2, 9, 8, 6, 7, 3, 1

Además, la complejidad de un objeto suele depender del nivel de detalle que queremos utilizar. Aunque todos estos objetos representen lo mismo, su nivel de detalle es distinto:

- “Una casa” es una cadena de texto que tiene 8 letras (56 bits de información).



Figura 11. Un icono

- Un icono representando una casa, como el de la figura 11, que ocupa 2.6 KBytes (20.8 Kbits de información).



Figura 12. Casa Batlló, de Gaudí en Barcelona

- Una foto de alta resolución (4043x2988 píxeles con 3 Bytes/píxel para el color), como la de la figura 12, que muestra todos los detalles de una casa sofisticada, y que ocupa 2.9 MBytes (23.2 Mbits de información).

- Una simulación de una casa realizada con un programa de *CAD*, donde se podría entrar y circular por sus espacios, lo cual requeriría muchos más bits de información.
- La casa real, con la posición de cada átomo que la compone.

Una vez definido el nivel de resolución con que vamos a analizar el objeto, hay que tener en cuenta que su complejidad tiene que ver con dos cosas:

- Buscar la forma de comprimir al máximo la información.
- Separar el orden estructural de lo que es puramente aleatorio. Lo aleatorio no se puede comprimir.

Es imposible automatizar estas tareas. La interpretación de los conceptos orden, estructura, complejidad y aleatorio está íntimamente ligada a la inteligencia.



Figura 13. El mismo objeto visto de tres formas, según la inteligencia del observador

En el ejemplo de la figura 13, una abeja ve “muchas cosas verdes” donde un chimpancé ve “un árbol con hojas” y un humano ve una estructura fractal. Cuanto más inteligente se es, más se puede eliminar el ruido, capturar lo estructural y comprimirlo en una descripción lo más corta posible.

Ese es también el objetivo de la ciencia: encontrar fenómenos que se repiten y describirlos con fórmulas matemáticas lo más cortas que se pueda.

La complejidad descriptiva de un objeto no es computable. Es decir, aunque la inmensa mayoría de las cadenas de bits son aleatorias (sin estructura), dada una cadena concreta, no hay forma computable de decidir si es o no aleatoria. Esto fue demostrado por Chaitin, de forma muy parecida a las demostraciones del teorema de indecidibilidad de Gödel y de la parada de Turing. Entonces, cuando calculamos la complejidad de un objeto, estamos manejando una cota superior. El valor real puede ser menor, pero no es computable.

Hay que advertir que, en este contexto, aleatorio y estocástico no es lo mismo:

- Aleatorio: que no se puede comprimir.

- Estocástico: generado por un proceso impredecible. Por ejemplo, una secuencia estocástica de lanzar ocho veces la moneda al aire y que salgan ocho caras (representada por 11111111) es improbable pero posible. Y resulta que esta secuencia concreta sí es comprimible (otras secuencias estocásticas puede que no lo sean).

En el contexto de la computación, emplearíamos los términos pseudoaleatorio y aleatorio, respectivamente, aunque ello vuelve la notación muy confusa. Por ello, a lo largo del libro voy a evitar usar la palabra “aleatorio”, que es ambigua, y solo usaré “pseudoaleatorio” (que no se puede comprimir) o “estocástico” (al azar), que tienen significados precisos y distintos. Además, diferenciaré “pseudoaleatorio” de “caótico” que son muy similares, pero con un pequeño matiz que ya hemos visto en el capítulo sobre caos del libro anterior. Ambos son fenómenos deterministas, es decir, repetibles si se conocen exactamente las condiciones iniciales. Detrás de ellos suele haber una ecuación exacta en la que no interviene el azar. A su vez, “estocástico” y “azar” son sinónimos y representan un tipo de fenómeno que no tiene causas, que no es repetible, que no responde a una ecuación.

Cualquier secuencia de números pseudoaleatoria tiene ciertas garantías matemáticas. Entre las pruebas que debe superar, nunca jamás aparecerá 11111111, pero curiosamente no es en realidad estocástica, sino determinista, aunque usa una fórmula muy compleja.

Si pudiéramos eliminar todo lo estocástico de una cadena de bits que describa a un sistema, lo que queda sería una medida verdadera de su complejidad efectiva. De hecho, la evolución produce esa capacidad de separar lo estocástico de lo repetitivo, de entresacar la información estructural donde aparentemente solo hay ruido.

Podemos ilustrar el problema de diferenciar lo estructural de lo anecdótico (o azaroso) con el siguiente ejemplo: voy en automóvil de mi casa al trabajo y escribo la secuencia de acciones realizadas con los controles del vehículo, siendo:

- Acelerador (A). Donde cada letra A consecutiva significa un 10% más de aceleración. Por ejemplo A significa 0% de aceleración (pedal sin pisar) mientras que AAA significa que el pedal del acelerador está hundido en un 20%.
- Timón (T). El timón puede dirigir el automóvil desde 45 grados hacia la izquierda hasta 45 grados hacia la derecha, en 10 saltos de 9 grados cada uno. De este modo, TTTTTT significa ir de frente, TTTT significa girar ligeramente a la izquierda y TTTTTT significa girar ligeramente a la derecha.

- Palanca de Cambio de marchas (C). Poner la palanca de cambio en primera se codifica C, en segunda CC, en tercera CCC, en cuarta CCCC, en neutro CCCCC y en reversa CCCCCC.
- Grado de frenada (G). Donde cada letra G consecutiva significa un 10% más de frenada. Por ejemplo, G significa 0% de frenada (no estoy pisando el pedal), mientras que GGGGG significa un 50% de frenada.

De este modo, cada vez que realice el recorrido obtendré una secuencia de letras ATCG.

Encontraremos secuencias que se repiten con mucha frecuencia como CCCCCGGGGG que significa que estamos detenidos (seguramente esperando en un semáforo rojo), o GCAACCAAACCCAAAA que significa que estamos arrancando (típicamente cuando el semáforo se pone verde).

Si nos empeñamos en buscarlos, encontraremos muchos patrones, pero todo ello es inútil por lo anecdótico. Estamos analizando un sistema a un nivel que tiene demasiados detalles descriptivos al azar, que realmente no indican nada. Todos los días logro mi objetivo de ir de casa al trabajo, pero cada día ocurren cosas imprevisibles que alteran mis acciones sobre el vehículo (un atasco que me obliga a cambiar de ruta, un gato que se atraviesa y tengo que frenar bruscamente, tráfico lento que me obliga a ir más despacio, etc.). De ese conjunto de secuencias no podremos deducir ninguna información (que me lleva de la casa al trabajo) hasta que logremos eliminar todo ese ruido.

LA GRADUALIDAD Y LA EMERGENCIA

Si bien estamos argumentando que la vida, la inteligencia, la consciencia y la libertad no son cuestiones de todo o nada sino graduales, tampoco tienen por qué crecer linealmente. Puede haber saltos. Los saltos se originan habitualmente por realimentaciones positivas y negativas (Figura 14).

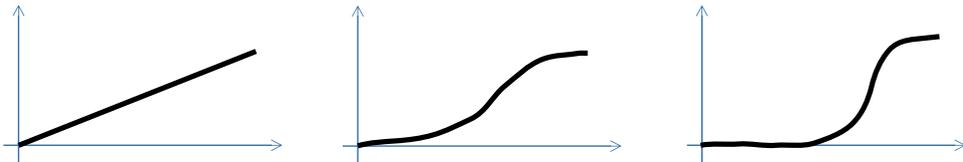


Figura 14. Crecimiento de la complejidad: a) lineal; b) no lineal; c) francamente exponencial con saturación.

Hay zonas de crecimiento aparentemente lineal, hasta que se llega al punto de desbordamiento, o de emergencia en las cuales el crecimiento es expo-

nencial, hasta que se agota algún recurso y el sistema se vuelve a estabilizar, pero allí aparece un nuevo bucle y poco a poco va aumentando otra vez la complejidad (Figura 15). Y ello puede ocurrir varias veces. De hecho, las zonas de aparente estancamiento o de crecimiento lineal muy bien pueden ser el comienzo de la exponencial, que al principio es muy lenta. Al respecto, el crecimiento exponencial de la tecnología que estamos viviendo comenzó en el Neolítico, cuando el *Homo Sapiens* comenzó a fabricar las primeras herramientas, pero seguramente no se daba cuenta de ello: pasaron miles de años y la vida seguía más o menos igual. Hasta la época de nuestros tatarabuelos el crecimiento podría parecer cero o a lo mucho lineal, pues ellos apenas tuvieron que aprender algo nuevo en su vida, como la radio. No llegó ningún aparato más a la casa en toda su vida, por contraste con nuestros tiempos, que llegan nuevos *gadgets* cada pocos meses.

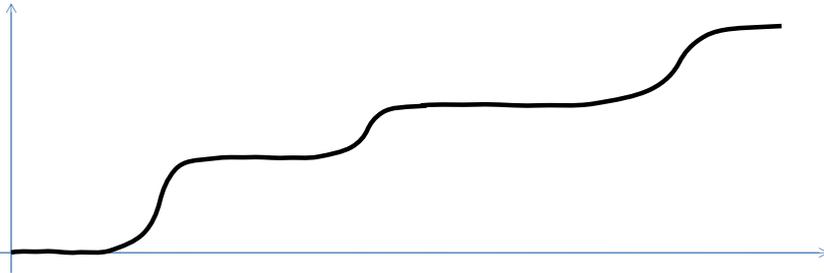


Figura 15. Sucesivos crecimientos exponenciales de la complejidad

La emergencia es un fenómeno exponencial. Se acumulan interacciones en el nivel inferior, que producen una avalancha de más interacciones, gracias a algún bucle de realimentación positiva. Al final, aparece un bucle de realimentación negativa (puede ser una simple saturación) que estabiliza el sistema. Pero ha dejado una huella, una acumulación de novedades que crea una perspectiva distinta de ver las cosas. Aunque hay que matizar esto: la mayoría de las veces la emergencia es solo una cuestión subjetiva de interpretación, que crea una nueva ontología de objetos y relaciones, que antes no existía, pero solo a los ojos de un observador inteligente. Por ejemplo, cuando tenemos muchas moléculas gaseosas de oxígeno, nitrógeno, agua y anhídrido carbónico, ellas chocan entre sí y rebotan, siguiendo las leyes de la física, de la conservación del momento. Cuando hay una cantidad enorme de estas moléculas, emergen unas propiedades medibles por nosotros, como volumen, presión y temperatura, pero las moléculas siguen interactuando entre sí según la ley de conservación del momento. No comienzan a obedecer nuevas leyes de alto nivel relativas a temperatura y presión. Nosotros si

podemos comenzar a explicar y predecir los sistemas con los nuevos conceptos. Por ejemplo, si mezclamos dos recipientes con aire, cada uno a cierta temperatura, podemos saber a qué temperatura quedará el aire resultante sin necesidad de calcular los momentos de cada molécula. Hay una nueva ontología y unas nuevas reglas de interacción. Pero son solo aproximadas, pueden ser incluso una excelente aproximación, pero las reglas que operan realmente siguen siendo las de las colisiones entre moléculas que conservan su momento.

Y si surge alguna discrepancia entre las reglas de alto y bajo nivel, son las de bajo nivel las que realmente se cumplen. Quizás por eso en alto nivel aparecen fenómenos aparentemente estocásticos, cuando sus predicciones se apartan de lo que realmente ocurre en el bajo nivel.

Sin embargo, también hay veces donde la emergencia deja de ser una mera cuestión de interpretación. Y eso ocurre cuando aparecen nuevos objetos con relaciones nuevas entre ellos. Más adelante veremos un ejemplo con el concepto del dinero.

Regresando al tema de la gradualidad, cuando una propiedad crece linealmente, y de la emergencia, cuando crece exponencialmente, si decimos que un destornillador es inteligente (Figura 2), no queremos decir que sepa detectar sus errores, corregirlos, aprender nuevas técnicas o incluso adaptarse a resolver nuevos problemas. Todo ello es producto de emergencias de muy alto nivel. El destornillador es inteligente porque sirve para algo: para fijar tornillos. En ese sentido, una piedra es menos inteligente que un destornillador. Pero en cualquier caso estamos muy lejos de la inteligencia en el sentido humano, que es también un fenómeno emergente.

Como resumen de lo que es la emergencia, podemos decir que hay un crecimiento gradual de nuevas propiedades a la vez que, de vez en cuando, hay emergencia exponencial de otras nuevas. Esto ha sido motivo de discusiones apasionadas en teoría de la evolución entre los gradualistas (como el propio Darwin) frente a los puntualistas (como Jay Gould) que no tienen mucho sentido, pues ambos tienen razón. Es habitual que se den ambas cosas simultáneamente y en muchos niveles. Debido a la competencia, poco a poco se van refinando y mejorando características ya existentes. Eso es lo que se conoce como evolución gradual, que ocurre a lo largo de cientos, miles e incluso millones de años, cuando es de tipo biológico. La competencia es un algoritmo optimizador (como hemos visto en el capítulo de algoritmos evolutivos del libro anterior) y produce mejoras graduales. Por el contrario, la cooperación es emergente: cuando ocurren por accidente situaciones donde dos o más individuos se ven obligados a cooperar para mejor sobrevivir y reproducirse, entonces aparecen nuevas estructuras que antes

no existían. En biología, la cooperación es lo que logra los grandes saltos evolutivos, como el paso de las células procariotas a las eucariotas, muy bien explicado por Lynn Margulis en el libro *¿Qué es el sexo?* Y si quieres conocer todos los saltos evolutivos que se han dado hasta ahora, te recomiendo leer el libro *Ocho hitos de la evolución*, de John Maynard Smith.

¿LA COMPLEJIDAD PUEDE CRECER INDEFINIDAMENTE?

No parece que sea este el caso aun cuando no hay ningún límite prefijado de antemano. En el 2001 con José Alejandro Gómez, en EVALAB, realizamos una serie de experimentos con algoritmos coevolutivos, donde hay muchos agentes cooperando o compitiendo entre sí. Y vimos que la cooperación se construía, y podía aumentar y durar mucho tiempo, pero sin ninguna razón aparente llegaba un momento en que se destruía por completo, y el proceso volvía a comenzar. La forma de hacerlo recordaba las extinciones masivas que ha sufrido la vida en nuestro planeta.

En sistemas sociales parece ocurrir lo mismo. Muchas civilizaciones se extinguieron sin ninguna razón aparente, como la civilización Maya en México y Centroamérica, que colapsó en el siglo IX en un momento de gran prosperidad. Las gentes abandonaron las ciudades sin que se sepa la causa real, aunque probablemente afrontaron problemas de superpoblación y sequías, teniendo unos gobernantes que daban respuestas tradicionales a problemas que eran nuevos. Algo similar ocurrió con la civilización del Valle del Indo en la Edad del Bronce, que también desapareció abruptamente. La caída del imperio romano está más documentada pero aún hay mucha discusión sobre las causas, que parecen más internas (la corrupción, enfermedades, hambre y un imperio demasiado grande para la velocidad de comunicaciones de la época) que externas (los bárbaros).

Roger Lewin en su libro *Complexity* documenta muchos de estos colapsos, principalmente de culturas norteamericanas como la del Chaco. Lewin nos hace notar que suele haber un patrón común: las sociedades incrementan sus actividades, principalmente la construcción, justo antes de colapsar. En estas civilizaciones, la etapa previa al Estado es muy estable y cuando finalmente surge el Estado, viene precedido de un colapso. Es decir, no necesariamente el colapso lleva a la desaparición de la sociedad, sino que puede conducir a otra forma de organización social.

William Irwin Thompson (2001) insiste más en el mismo fenómeno: es común en la historia ver cómo las transformaciones radicales son precedidas por una intensificación de las posiciones antiguas. Por ejemplo, en la Edad Media cuando la armadura se hace tan sofisticada que cada parte del cuerpo

está protegida con algún accesorio, y a causa de ello es tan pesada que para elevar a los caballeros sobre los caballos se emplean mecanismos de palancas y poleas; pues bien, es justo en ese momento en que la armadura se vuelve obsoleta, debido a la invención de las armas de fuego, desapareciendo el feudalismo y dando paso a los Estados nación. Thompson llama a esto el efecto de ocaso o de supernova. Y lo más probable es que se trate no tanto de una intensificación, sino de una exponencial volviéndose cada vez más rápida. En la figura 16 representamos un crecimiento de complejidad exponencial que justo antes de explotar y destruir el sistema (la línea a trazos) consigue convertirse en otra cosa, que a su vez sufre otro crecimiento exponencial, y así sucesivamente, pero cada vez más deprisa. Es muy similar a la figura 15, pero en esta las exponenciales terminan en saturación, mientras que en aquella terminan en destrucción. Esta figura también representa muy bien lo que ocurre con las actuales tecnologías electrónicas, informáticas y de comunicaciones. Por ejemplo, de la escritura en piedra a la imprenta, a la máquina de escribir, a los teletipos, a los computadores, a los portátiles, tabletas y teléfonos móviles... Las transiciones son cada vez más rápidas. Todas las empresas fabricantes deben innovar cada vez más deprisa. Recuerdo cuando en 1970 se comenzó a hablar de las memorias de burbujas magnéticas y que IBM dijo que esperarían 10 años para instalarlas en sus computadores porque no veían en ese momento necesidad de mayores capacidades. Suena gracioso porque si hoy se te ocurre una gran idea, hay que sacarla a producción en menos de seis meses si no quieres que la competencia te adelante.

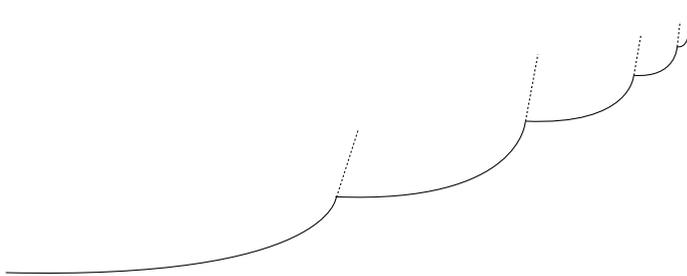


Figura 16. Sucesivos crecimientos exponenciales justo antes de la catástrofe

Y en esta figura donde se evita el final brusco de las exponenciales conmutando a otras exponenciales cada vez más rápidas, se vislumbra un final nada halagüeño.

De hecho, hay varios visionarios que ya se han dado cuenta de que nos espera un problema gordo alrededor del año 2050: lo llaman “la gran singularidad” y tiene que ver con que para esa fecha aproximada un computador,

siguiendo la ley empírica de Moore¹⁵, habrá alcanzado la capacidad de cómputo equivalente a todos los cerebros humanos juntos. Y eso tiene que tener consecuencias importantes para el funcionamiento de las sociedades, aun cuando ahora mismo no podamos imaginar cuáles van a ser.

No obstante, se esperan más singularidades alrededor de esa fecha, como que se acaben el petróleo y el agua potable. Los principales divulgadores de esta idea son Ray Kurzweil y Peter Diamandis, que fundaron en *Silicon Valley* la *Singularity University* con ayuda financiera de Google y NASA. En matemáticas “singularidad” significa “infinito” y esa es la idea: hay algo que está creciendo o decreciendo de forma exponencial para terminar en una singularidad. ¿Qué va a pasar entonces? Probablemente un colapso de la civilización con todo tipo de guerras, que quizás dé lugar a otro tipo de organización social, como señalan Lewin y Thompson. Pero Kurzweil y Diamandis son optimistas y piensan que nos espera un futuro completamente tecnológico, con todas las necesidades de supervivencia satisfechas y donde nuestra imaginación es el límite. Un futuro de abundancia. ¿Vamos a esperar a ver quién tiene razón? ¿No será más inteligente anticiparnos y construir la solución más razonable para la humanidad? Kurzweil actualmente dirige una división de Inteligencia Artificial de Google, y piensa que el futuro está ahí: las máquinas realizarán todo el trabajo, incluso probablemente serán las administradoras de la sociedad (quizás eliminando así la corrupción en la política). Obviamente la gente no querrá morir de hambre porque se quede sin trabajo, y los empresarios no querrán ver quebrar sus empresas porque ya nadie tiene poder adquisitivo para comprar los bienes que producen. La solución a este problema puede ser el salario universal, un salario razonable que el Estado da a todas las personas tanto si trabajan como si no. Ya se han hecho experimentos al respecto, algunos con mucho éxito, en ciertas regiones de Canadá, en Uganda, en Brasil, Finlandia, Alaska, Escocia y Holanda. Hace unos meses, sorprendentemente, Suiza lo rechazó en un referéndum. Mucha gente cree que no es necesario prepararse para ese futuro, que los computadores no llegarán a desplazar a los humanos porque la creatividad humana no se puede imitar, que las cosas siempre seguirán igual. Todo eso es falso. Precisamente los algoritmos evolutivos son fuertemente creativos y han conseguido resultados que emulan y superan a los de los humanos. Si la inercia social nos impide reaccionar a tiempo, eso sí nos puede llevar a la catástrofe.

15 Que dice que el número de transistores en un chip se duplica cada 2 años, a la vez que el chip se hace más rápido y barato. Es decir, la capacidad de cómputo del silicio crece exponencialmente.

Y ¿cuáles son los mecanismos que llevan los sistemas complejos a su destrucción? Se han identificado tres formas, que son meros aspectos de lo mismo:

- Para aumentar su complejidad usan muchos recursos, socavando los del nivel anterior. Por ejemplo, en la Isla de Pascua se supone que los habitantes se enzarzaron en competencias para fabricar más y más estatuas *moái* de modo que acabaron con los árboles que usaban para transportarlas y sin los cuales no pudieron construir más canoas para pescar. Otro ejemplo en los tiempos actuales, es que para poder construir más y más objetos industriales, que se venden muy bien, estamos envenenando el aire y el agua.
- La complejidad es tan alta que la gente ya no puede entenderla (es lo mismo que el punto anterior, con la salvedad de que los recursos que se acaban no son físicos sino intelectuales). Se produce entonces un auge de los populismos y de las ideas esotéricas porque la gente prefiere mentiras sencillas a verdades complejas. Con ello la sociedad compleja y sofisticada se resquebraja en trozos y se destruye. Posiblemente eso es lo que está ocurriendo ahora mismo con el Brexit, la elección de Trump y el resurgimiento de nacionalismos. En lo personal, puedo mencionar como anécdota que, hablando con gente que vive a la orilla del mar, muchos no creen en el cambio climático con el consiguiente derretimiento del continente Antártico, porque en toda su vida el nivel del agua no ha aumentado. Sin embargo, y aunque ellos no son conscientes, en los últimos 100 años ya ha subido unos 15 cm. El problema de hacer la medida a ojo es que el mar no es plano. Tiene olas, corrientes, movimientos por vientos y mareas, tormentas. Además, la subida es muy lenta para apreciarla en unos pocos años. Una persona no puede medir si ha subido o no, ni cuánto. La ciencia está usando diversos métodos y ahora tenemos uno preciso que son las mediciones desde satélites. Y ellas indican una subida actual de 3 mm/año que, además, no es lineal como se creía al principio, sino acelerada, como corresponde a cualquier fenómeno complejo con realimentación positiva. Todo ello es muy difícil de entender para una persona común. Es más simple suponer que sus ojos no le engañan y que todo sigue igual. Las mentiras simples triunfan sobre las verdades complejas.
- El aumento de la complejidad, generando estructuras que dependen fuertemente de las antiguas, vuelve el sistema muy frágil. Cualquier incidente externo puede destruir el sistema. Esto pasa con el oso panda de China, que se especializó tanto en comer bambú, que puede extinguirse si desaparece esta planta. Eso puede pasar con nuestros

sistemas eléctricos, electrónicos y de comunicaciones en los que se basa por completo nuestra actual sociedad de la información. Una tormenta solar fuerte (o una bomba atómica electromagnética) podría quemar la mayoría de los equipos, incluyendo sus fábricas, y devolvernos al Neolítico. Recordemos que un fallo de suministro eléctrico en 1995 en una fábrica de semiconductores en una isla de Malasia o un simple incendio en otra fábrica en 2013 en China afectaron fuertemente a la industria mundial de computadores.

Al principio la evolución genera complejidad creciente pero tampoco está garantizado que perdure. Es bien sabido entre los ingenieros que usamos algoritmos evolutivos, que funcionan mal al final, cuando se aproximan a una buena solución, porque entonces cualquier mejora que hagan es pequeña y la presión selectiva, que se basa precisamente en eso, también es pequeña. Especialmente si se han formado sociedades con cooperación interna, la población puede crecer exponencialmente sin ningún freno. Entonces, cuando las poblaciones son grandes, puede haber pequeños grupos de individuos que se muevan al azar o incluso en dirección contraria a la presión selectiva, sin que por ello vayan a desaparecer, ya que el resto de la comunidad los mantiene. Eso incluye cosas tan diversas, pero todas contrarias a la evolución, como el celibato, el control de la natalidad decidido por el individuo o por el Estado, el suicidio colectivo o el terrorismo. La razón de que estos fenómenos prosperen es el tiempo libre, la superpoblación y las temporizaciones. Veamos lo que significa cada factor.

Tiempo libre. Cuando superas de forma sistemática y automática los retos que la vida te pone por delante, entonces te queda tiempo libre. El tiempo libre permite hacer actividades raras, no relacionadas con la supervivencia ni la reproducción, como por ejemplo pintar en las paredes de las cuevas y construir naves espaciales. En muchos casos, esos subproductos se enredan culturalmente con los genes para apoyar su objetivo de supervivencia. Es así como recitar un poema puede ser el prelude de una boda, o desarrollar tecnologías médicas puede alargar vidas. Y quizás las naves espaciales puedan evitar una extinción masiva. Pero en otros casos esos subproductos pueden ir en contra de la supervivencia de los genes, y así hemos creado artefactos de guerra encaminados a exterminar toda la vida del planeta.

Superpoblación. Cuando tienes superpoblación en un ambiente social, si hay un grupo pequeño de individuos que no se reproducen o incluso que se matan entre sí, ello no se nota a corto plazo pues el grueso de la población seguirá allí y, por tanto, no habrá ninguna presión evolutiva para evitarlo. Lo malo es que las ideas del grupo pueden propagarse con mucha rapidez si

se da el ambiente adecuado, como ocurre con los populismos políticos, de manera que cuando comiencen a ser evidentes sus efectos será demasiado tarde para frenarlas, pudiendo destruir por completo la sociedad. La superpoblación enmascara muchos problemas.

Temporizaciones. Los retrasos temporales también juegan un papel importante: la constante temporal de la evolución es el tiempo entre generaciones. Por ejemplo, en los humanos está entre 20 y 30 años, mientras que en las bacterias es cuestión de unas pocas horas. Ese es de alguna manera el periodo de muestreo donde el algoritmo evolutivo ejerce su control. Pero puede haber fenómenos más lentos o más rápidos que escapen a ese control:

- Más lentos: cuando se inicia un proceso que no tiene importancia en las generaciones inmediatas, pero que traerá consecuencias en las generaciones del futuro lejano. Por ejemplo, la contaminación del planeta: la evolución no puede evitarla porque es un proceso exponencial que comienza de forma imperceptible, de modo que no impide tener hijos y nietos a los individuos actuales. No obstante, afectará adversamente a los tataranietos, cuando la exponencial crezca y no haya forma de pararla.
- Más rápidos: una persona nace, crea arte, tiene hijos y muere. La evolución no favorece ni impide el arte, que se hace a una velocidad más rápida. El algoritmo evolutivo no nota que estamos empleando el tiempo libre en cosas que no le interesan pues no afectan a la supervivencia ni a tener hijos. Sin embargo, en el tiempo libre puedes hacer cosas que interfieran a largo plazo con la evolución, como fabricar bombas atómicas.

Otro ejemplo: la ciencia es un sistema evolutivo, ya que hay una colección de ideas que se reproducen haciendo pequeños cambios o combinándose con otras y sometidas a la presión selectiva de la evaluación de pares para alcanzar su publicación. Sin embargo, se ha constatado que el fraude en ciencia va en aumento (Smaldino y McElreath, 2017). Las razones se acaban de explicar: hay superpoblación de artículos en revistas y congresos, de modo que inicialmente el fraude no supone un grave perjuicio para todo el sistema, que sigue funcionando. Aunque con el paso del tiempo puede colapsar, ya que las investigaciones se hacen confiando en la verdad de los resultados publicados anteriormente. Pero ese proceso es mucho más lento que el evolutivo. Mientras tanto hay unos beneficios inmediatos para el investigador, quien recibe recompensas salariales y de prestigio cuanto más publique. Este otro proceso es mucho más rápido que el evolutivo. Y, como consecuencia, la ciencia puede colapsar.

EMERGENCIA, TRANSICIONES DE FASE Y AUTOORGANIZACIÓN

Son conceptos muy similares. Se dice que ha habido emergencia cuando de la interacción de individuos aparece una nueva propiedad que no estaba en ninguno de ellos por separado. Mientras que cuando hablamos de transiciones de fase¹⁶ estamos explicando el mismo fenómeno pero haciendo énfasis en que hay un umbral en la cantidad de individuos que produce el cambio. Por debajo del umbral la población se encuentra en un estado (o fase) y por encima, en otro.

Cuando se habla de autoorganización es porque un conjunto de individuos se reúne y colabora para formar un superorganismo que preserva su propia frontera, lo cual también es un fenómeno emergente y también requiere superar un umbral, pero ahora hacemos énfasis en que aparece un superorganismo que antes no existía. Por ejemplo, un conjunto de moléculas forma una célula; un conjunto de células forma un animal; un conjunto de pájaros forma una bandada. Una característica importante de este fenómeno es que no hay un control central que decida cómo van a interactuar los entes. Todo ocurre de forma distribuida, redundante y con tolerancia a fallos (no le pasa nada a la bandada si un pájaro cambia de lugar o se muere). La autoorganización es productora de neguentropía, o entropía negativa¹⁷.

Y aunque hay muchos ejemplos de sistemas autoorganizados, tanto biológicos como computacionales, no se ha hecho un estudio acerca de cuántos bits de complejidad se requieren para que aparezca este fenómeno. Pero no parecen ser muchos porque lo único que se requiere son unas simples reglas de interacción entre individuos.



Figura 17. Autoorganización de una bandada de pájaros en el cielo de Madrid

16 Término tomado de la Física, por analogía a las transiciones de fase entre líquido y sólido.

17 Claro, a nivel local, pues ya sabemos que globalmente la entropía siempre aumenta.

Desde luego, si ya existe la evolución, lograr agrupación de entes (o lograr cualquier otra cosa) es relativamente sencillo. En el video del profesor William C. Ratcliff del 2014 que se encuentra en las referencias, podemos ver el experimento de cómo pasar de células aisladas a un cuerpo multicelular sencillo. En general, si tienes una población que se reproduce y hay pequeños errores en las copias, puedes guiar la evolución a que cumpla casi que cualquier objetivo, manipulando adecuadamente la función de aptitud, es decir, decidiendo quiénes son los que se reproducen. Pero incluso si no usamos ningún algoritmo evolutivo, la autoorganización puede surgir de la combinación de reglas simples. Y eso es lo que vemos cuando los pájaros forman bandadas (Figura 17): un observador ingenuo podría pensar que hay un pájaro líder que da las órdenes de cómo deben seguirlo los demás pájaros, pero los biólogos saben que eso no es así. No hay ningún líder en las grandes bandadas de pájaros. Hace ya mucho, en 1987, Craig Reynolds escribió *Boids*, un modelo de *software* en el que se puede observar el mismo fenómeno si cada pájaro sigue básicamente dos reglas:

- Moverse en la dirección y velocidad promedio de los pájaros que tiene a su alrededor.
- Evitar choques con otros pájaros u obstáculos.

Entonces, de la interacción de esas dos simples reglas operando en un gran número de individuos surge un fenómeno emergente de autoorganización: la bandada.

Los cardúmenes de peces se forman usando unas reglas parecidas, a las que se añade otra: moverse hacia el centro, con lo cual evitan estar en el borde exterior del cardumen, que es donde se corre más peligro de ser devorado por peces mayores. El resultado de ello es un movimiento característico del cardumen, en rotación continua hacia adentro.

Otro ejemplo de emergencia en poblaciones de animales lo encontramos en Miller (2010). La langosta del desierto del norte de África es caníbal y tiene dos modos de funcionamiento: cuando hay pocas, se mantienen alejadas entre sí comiendo vegetales. Mientras que cuando llueve y las larvas de los huevos encuentran comida de sobra se produce superpoblación. Entonces se encuentran demasiado juntas pero de forma inestable, pues cada una trata de comerse a la que tiene delante, a la vez que tratan de evadir a las que están detrás. Por ello el miedo las empuja a saltar continuamente hacia adelante y allí donde caen producen pánico que a su vez obliga a saltar a las siguientes, en un fenómeno de realimentación positiva. Ahí es donde se convierten una plaga temible, que acaba con todo lo que encuentran. Es interesante saber que la hormona que regula esta transición de fase en la langosta es la sero-

tonina, que también la tenemos los humanos, aunque todavía no se sabe si puede producir efectos similares.

Además, no solo hay autoorganización en sistemas vivos. También existe en cualquier otro sistema donde haya muchas partes que interactúen entre sí de forma no lineal. Los ejemplos clásicos son las dunas (Figura 18), que se forman por la interacción del viento con muchas partículas de arena, y que producen pendientes y formas muy similares a pesar de que no hay comunicación entre ellas. Las dunas son un ejemplo de criticalidad autoorganizada que se produce cuando hay al superarse algún umbral aparece una realimentación positiva. La pendiente de las dunas es de un 35% aproximadamente. Cuando alcanza valores mayores se derrumba porque los granos de arena no pueden soportarse unos sobre otros, y en su caída pueden golpear y arrastrar a otros. Esa es la realimentación positiva. Debido a consideraciones físicas y geométricas emerge esa pendiente que suele ser algo menor a 35% para que sea estable, es decir, para que no ocurra la realimentación positiva. Además, las avalanchas que aparecen siguen una ley de potencias con exponente cercano a 2, dependiendo del modelo y condiciones usadas. Hay muchas avalanchas pequeñas y pocas grandes.



Figura 18. Dunas y microdunas en Mangue Seco, Brasil

Otro ejemplo de criticalidad es el contenido de oxígeno de la atmósfera, que es del 21%. Si alcanzase el 25% se producirían incendios imposibles de apagar, pero entonces el oxígeno se consumiría hasta alcanzar un nivel seguro. Por ello lo habitual es ver niveles un poco menores a 25%. Otro ejemplo descubierto muy recientemente es la masa del bosón de Higgs, que es de 126Gev,

lo cual produce un universo al borde del colapso. Si se superase ese umbral no observaríamos ningún universo ya que ni siquiera existiríamos nosotros.

Alan Turing también realizó trabajos valiosos sobre la emergencia de patrones en la piel de los animales, que no vieron la luz en su momento sino solo hace unos pocos años pues, al parecer, no llamaron la atención de su director de tesis doctoral. Las cebras y los tigres tienen rayas, mientras que el guepardo tiene manchas y muchos peces tropicales, ranas y serpientes también exhiben patrones coloreados. Debería ser obvio que el cerebro de los animales no se encarga de guiar esta coloración pues tiene cosas más importantes en que ocuparse, de modo que el cómputo es local: una célula de la piel decide ponerse de un color o de otro en función de lo que hagan sus vecinas. Turing propuso un modelo de reacción-difusión (resumido en la ecuación 4), que es continuo y que trata de capturar las reacciones químicas que ocurren cuando se encuentran dos o más sustancias, así como su difusión cuando hay diferentes concentraciones. Este modelo da cuenta de muchos patrones ordenados que surgen en la naturaleza. Según lo explica Peña (2002), consiste en dos sustancias que reaccionan entre sí, pero que también se difunden, es decir, se mueven de los lugares donde hay más concentración hacia donde hay menos. Suponemos que una de las sustancias es autocatalítica, es decir, que genera la producción de más de sí misma, o sea, se trata de un bucle de realimentación positiva. Esta sustancia también produce por reacciones una segunda sustancia, que es inhibidora de la primera, conformando un bucle de realimentación negativa. Ambas sustancias se difunden espacialmente pero a velocidades distintas y si en una zona hay más concentración de una sustancia que de otra, la piel del animal adquiere un color u otro. Al respecto, quizás recordemos del libro anterior el ejemplo de autómatas celulares llamado “bandera francesa”, donde era crítica la difusión de señales de colores a distinta velocidad, junto con un inhibidor.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D\nabla^2 C + f(C) \quad \text{Ec. 4}$$

En este modelo, C es el vector de concentraciones de sustancias, D es la matriz diagonal con los coeficientes de difusión de cada una y $f()$ es un vector que especifica las reacciones químicas entre las dos sustancias, es decir, son ecuaciones no lineales que indican cuanto se produce de cada sustancia en función de las concentraciones actuales de cada una.

James Dickson Murray fue quien desarrolló el trabajo más exhaustivo al resolver estas ecuaciones de forma aproximada, en función de los valores que se asignen a las constantes y aplicado a varios escenarios biológicos. Al hacerlo con la piel de los animales se producen soluciones donde el co-

lor es homogéneo, con manchas (vacas, guepardos) o rayas (cebras, tigres). Ciertos parámetros controlan lo grande o pequeño de las manchas o rayas. Al hacer el análisis matemático del problema, Murray (2002, vol. II, p. 147) enunció un teorema famoso por lo raro: la cola de los animales no puede terminar en manchas, aunque sí en rayas, debido a que son las únicas soluciones estables en espacios unidimensionales (las colas son aproximadamente unidimensionales).



Figura 19. Patrón rotacional en (a) aguacate; (b) madreperla; (c) bromelia; (d) maleza. Las hojas están numeradas, siendo 1 la más joven

El mismo modelo sirve para entender cómo crece un embrión a partir de sus células germinales iniciales. Predice que las extremidades de los animales terminan en cinco dedos, lo cual se ve incluso en las articulaciones de las aletas de las ballenas (Goodwin, 1998).

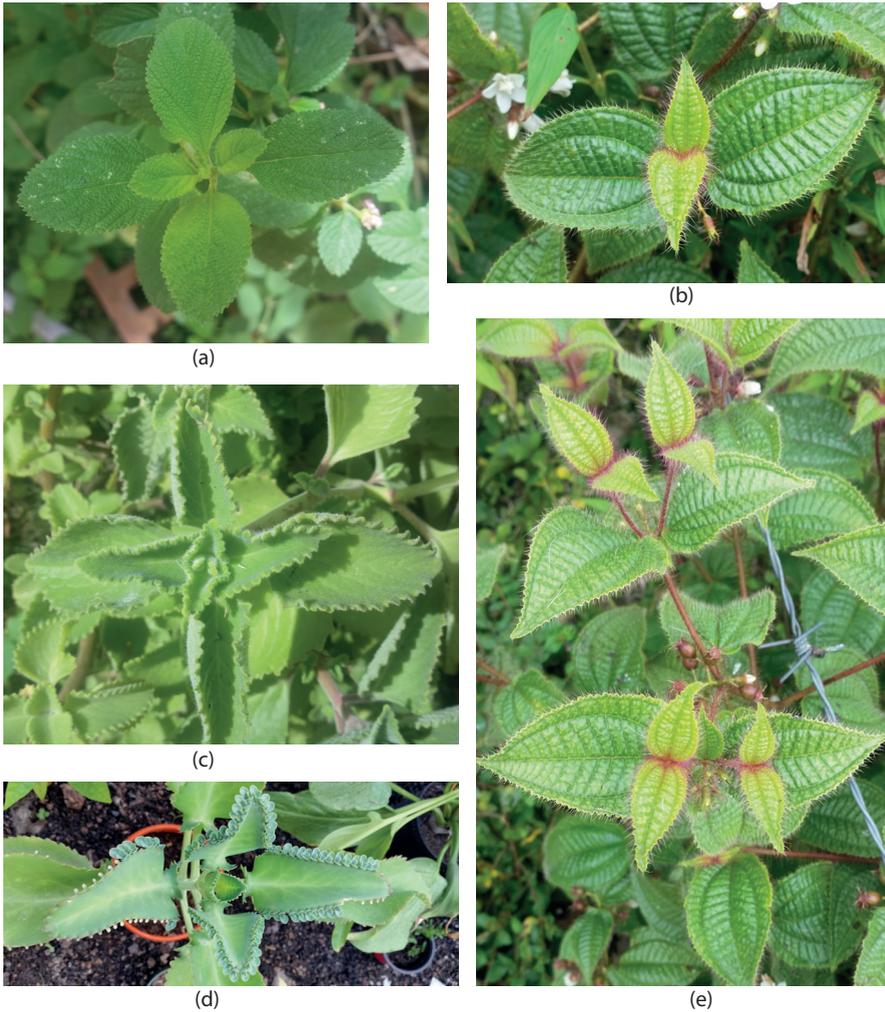


Figura 20. Patrón de oposición en (a) prontoalivio; (b) pipilonga (c); oreganón; (d) lengua de la suegra; (e) otro tipo de pipilonga

También explican el crecimiento de las hojas de muchas plantas que pueden aparecer según unos pocos patrones como el rotacional (Figura 19) y el de oposición (Figura 20), ambas muy bien explicadas por Brian Goodwin (1998) en su libro *Las manchas del leopardo*.

Aunque los biólogos no se ponen de acuerdo en los detalles, parecería que ambas estrategias corresponden a un proceso para maximizar la luz recibida. Las hojas recién nacidas son más pequeñas pero, en cualquier caso, proyectan sombra sobre las hojas más antiguas. Para el patrón rotacional el ángulo de giro es de esperar que sea un número irracional, y así ninguna hoja quedará exactamente encima de ninguna otra. Efectivamente en mu-

chas plantas sale el ángulo áureo, que es irracional trascendente, y que equivale al número áureo pero expresado en grados (aproximadamente 137.5 grados). La figura 21 y la ecuación 5 nos ayudan a recordar de donde salen estos números. Pero no hay garantías de que todas las plantas hagan lo mismo, como podemos ver en la figura 19-d, donde el patrón se repite pero el ángulo no es el áureo, y ello significa que los genes pueden haber encontrado otras soluciones en función de circunstancias difíciles de imaginar.



Figura 21. Número áureo y ángulo áureo

El número áureo tiene una gran ventaja y seguramente por eso es que aparece frecuentemente en la naturaleza: permite usar el mismo algoritmo para generar estructuras autosimilares a distintas escalas, donde permanezca la misma relación entre dos magnitudes. Como vemos en la ecuación 5, en un objeto con dos partes a y b , la relación del todo ($a+b$) respecto a la parte mayor (a) es la misma que la relación entre la parte mayor (a) respecto a la parte más pequeña (b). Son algoritmos recursivos, que producen fractales.

$$\frac{a}{b} = \frac{a+b}{a} \Rightarrow \text{phi} = \frac{a}{b} = 1.6180339 \dots$$

$$\frac{\alpha}{\beta} = \frac{\alpha+\beta}{\alpha} \quad \text{con } \alpha+\beta=360^\circ \Rightarrow \beta=137.507 \dots^\circ$$

Ec. 5

Si efectivamente es un proceso de optimización, quienes lo dirigen son los genes. No hay otra alternativa. Pero no tienen mucha libertad. Están restringidos a un espacio de formas matemático, y también encontrarán otras restricciones físicas y químicas. Un ejemplo de restricción física es que las hojas no pueden ser tan grandes que los tallos se rompan por su peso. Un ejemplo de restricción físico-químico-biológico es la imposibilidad de que las hojas floten libremente en el aire y transmitan a la planta la energía solar recibida vía enlaces de microondas, como planeamos hacer los humanos con paneles solares en órbita. Los genes no saben cómo hacer algo tan complejo, aun cuando pudiera ser óptimo. De la misma manera, los genes inventaron las patas de los animales para caminar, pero no las ruedas, porque es

imposible mantener vivo una parte del cuerpo si no se le pueden transmitir fluidos como la sangre o la savia, si está girando continuamente, de modo que cualquier tubo de transporte se retorcería y estrangularía al instante.

El patrón de oposición es más sencillo de entender y de ver, pues las hojas nacen por pares que se dirigen en direcciones opuestas. El siguiente par hace lo mismo, aunque está girado 90 grados respecto al par anterior. También así se logra recibir más luz solar. De nuevo, ante un patrón matemático evidente los genes pueden hacer variaciones, como vemos en la figura 20-e que nacen simultáneamente dos pares de hojas, en vez de uno solo. Y también se generan otras formas que podrían interpretarse como inicio de fractales, como en la figura 20-d que hay hojas en los bordes de las hojas. Los fractales vegetales son un tema extenso, abordado con mucha profundidad por Prusinkiewicz y Lindenmayer (2004) en su famoso libro *La belleza algorítmica de las plantas*.

Por ello, a esta propuesta de Turing se le llama modelo de morfogénesis, es decir, de generación de formas, lo cual —por cierto— dio lugar a un corto debate sobre si la evolución la controlaban los genes o las matemáticas de esta ecuación. La respuesta es que son las matemáticas las que generan las formas iniciales, mientras que los genes se limitan a introducir variaciones sobre el tema principal. Variaciones que al final pueden ser bastante grandes. Resaltemos que los genes están presentes únicamente en cuerpos biológicos, mientras que las ecuaciones de reacción-difusión actúan también en estructuras previas a la vida, como reacciones químicas y procesos geológicos que vamos a ver enseguida.

Beloúsov y Zhabotinski encontraron patrones en ciertas reacciones químicas que se creían imposibles en su época (Figura 22), por lo que sus trabajos fueron rechazados en las revistas durante mucho tiempo. Se trata de reacciones químicas reversibles, también llamadas reacciones-reloj, que son caóticas en el sentido débil¹⁸, de ser infinitamente sensibles a las condiciones iniciales. Al introducir cualquier perturbación en un punto de la superficie, aparecen allí nuevas ondas y estructuras de color.

Otra variante de este modelo, donde no hay reacciones sino solo difusión, sirve para explicar las celdas de Bénard (Figura 23) que se producen al calentar un líquido en una sartén. Visto lateralmente (Openlb, 2013), el flujo en cada celda es como un toroide descendiendo en el centro, enfriándose al llegar arriba y ascendiendo por los lados. Y visto desde arriba

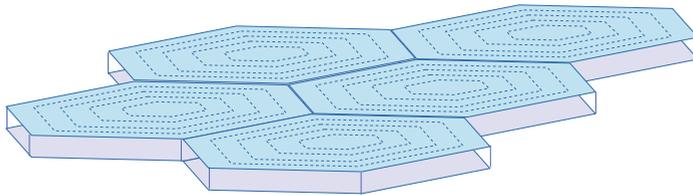
18 Recordemos que es imposible demostrar que haya caos en sistemas físicos, pues se requieren tres condiciones, dos de las cuales solo se pueden demostrar en sistemas formales, es decir, en modelos, no en sistemas físicos reales.

se forma un patrón de celdas más o menos hexagonales, que sugieren un posible origen matemático de los tejidos celulares (Guaicoloro, 2008).

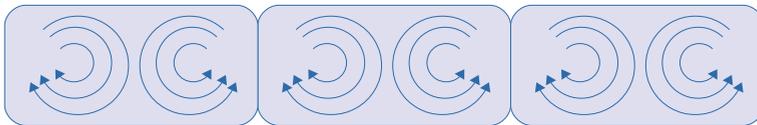


Figura 22. Reacción BZ. Fuente: CC BY 2.0, Michael Rogers (2010).

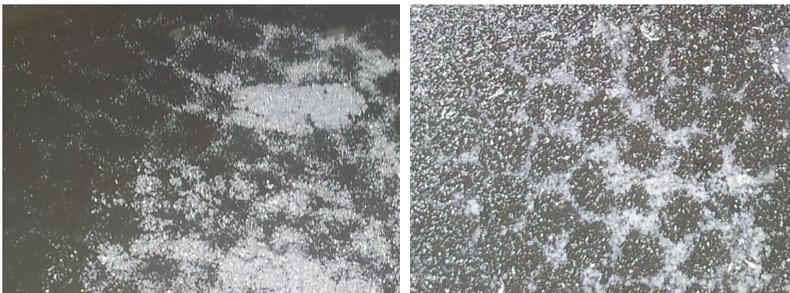
Disponible en: <https://goo.gl/gTSV2f>



(a)



(b)



(c)

Figura 23. Celdas de Bénard. (a) Patrón hexagonal; b) flujo del líquido, descendiendo en el centro de cada celda; c) fotos en una sartén con aceite y un medio de contraste

Se sabe que estas celdas existen en las altas temperaturas de la superficie del sol y, curiosamente, el mismo efecto (McKinnon *et ál.*, 2016) se acaba de observar incluso con las bajas temperaturas que hay en los mares de nitrógeno sólido de Plutón (Figura 24).

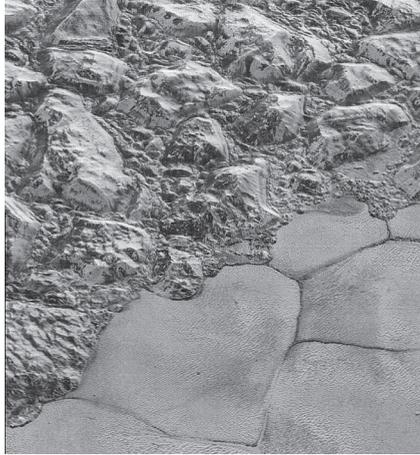


Figura 24. Mar de nitrógeno Sputnik Planum, en Plutón

Fuente: NASA/JHUAPL/SwRI

El modelo de Turing también explica la expansión de poblaciones de seres vivos, la propagación de enfermedades, etc., y se puede implementar en un espacio discreto 2D de tipo autómatas celulares. Como vemos, Turing fue otro de los grandes genios que no solo inventó los formalismos de la computación, sino los fundamentos de la vida artificial.

Otros ejemplos de autoorganización son las nubes (Figura 25) y ciertas formaciones rocosas (Figura 26).



Figura 25. Patrones en nubes, en la Chapada Diamantina, Brasil



*Figura 26. Piedra de la Tortuga en Sete Cidades, Brasil.
Las grietas se formaron por contracción de la piedra al final del Devónico,
lo que produjo unos patrones pentagonales y hexagonales*

Las realimentaciones que autoorganizan un sistema suelen generar algún tipo de patrón, como en todas estas figuras.

Como explicábamos, se dice que ha emergido una nueva propiedad cuando de la interacción de muchos entes surge algo nuevo que antes no existía. En ese sentido la bandada es un fenómeno emergente que aparece cuando interactúan muchos pájaros. La emergencia es un fenómeno que se suele dar al superarse un umbral de número de entes que interactúan. Por debajo de un cierto número N no pasa nada, mientras que por encima aparece un nuevo fenómeno. Un ejemplo trivial puede ser un lobo solitario, que no caza nada. Pero una manada de lobos sí puede acorralar a su presa. Otro ejemplo en física nuclear: si juntas uranio, al principio emite calor. Si juntas más uranio, emitirá más calor. Pero si juntas mucho más uranio pasará algo nuevo: explotará. La masa crítica es 52 kg.

Estos “números mágicos” suponen una transición de fase al superar un umbral. Muchos de ellos requieren umbrales bastante elevados, del orden de 10^{10} :

- Aproximadamente 10^{10} átomos forman una hebra de ADN.
- Aproximadamente 10^{10} moléculas forman una célula.
- Aproximadamente 10^{10} células forman un órgano.
- Aproximadamente 10^{10} neuronas forman un cerebro. Por ejemplo, el comportamiento de una neurona aislada es bastante sencillo y existen modelos matemáticos para ello. Si conectamos unas pocas decenas de neuronas, el comportamiento del conjunto se puede deducir

fácilmente a partir del modelo matemático de la neurona aislada. Pero cuando se supera un umbral que debe de estar alrededor de 10^{10} neuronas interconectadas, aparecen comportamientos extremadamente complejos, como el pensamiento.

- Aproximadamente 10^{10} personas forman... ¿quién sabe? Se especula actualmente que la globalización, con todos los seres humanos conectados por Internet quizás esté generando un nuevo tipo de superorganismo. Algunos de los superorganismos más pequeños son fáciles de reconocer: son las ciudades. Todas tienen una estructura interna similar (centros de decisión, centros de compraventa de alimentos, redes de distribución de energía, agua y comunicaciones, redes de calles y lugares de esparcimiento). Es un patrón que se reproduce pues continuamente están naciendo nuevas ciudades. El patrón es el mismo, aun cuando las personas que constituyen cada ciudad sean distintas. Las ciudades primitivas crecían a lo loco, pero las modernas ya tienen algo de consciencia de sí mismas, pues poseen documentación como planos, historia, planeación futura, etc.
- Aproximadamente 10^{10} estrellas forman una galaxia.
- Aproximadamente hay 10^{10} galaxias en nuestro universo.

Este número que se repite tanto puede ser solo una casualidad, pues hay otros umbrales bastante menores en otros sistemas.

Los fenómenos emergentes comparten una serie de características:

- Ocurren cuando el número de objetos que interactúan supera un umbral, aun cuando no esté muy bien definido. El umbral a veces puede ser 3, como en el caso de la gravedad que con 2 cuerpos la teoría funciona perfectamente, mientras que con 3 o más cuerpos es un fenómeno complejo e impredecible. A veces pueden ser miles, como las hormigas incapaces de sobrevivir solas, pero que en un hormiguero se vuelven invencibles. A veces pueden ser miles de millones, como las neuronas que aisladas no hacen más que cálculos simples, pero que al superar el mencionado umbral producen inteligencia y consciencia.
- No hay un control centralizado. La hormiga reina es solo el aparato reproductor del hormiguero, pero ella no da órdenes. No hay un líder en la bandada de pájaros. Y dentro del cerebro humano no hay una superneurona que organice cómo deben trabajar las demás.
- Las interacciones entre objetos pueden ser muy sencillas, pero deben ser no lineales, para que el fenómeno emergente no se pueda predecir por simple superposición (suma) de muchas pequeñas interacciones.

- El fenómeno emergente nos pilla casi siempre por sorpresa. No es posible deducirlo de las propiedades de los objetos y sus interacciones. A veces incluso puede ser antiintuitivo, como cuando hay un banco muy sólido, pero aparece un rumor de que va a quebrar; ninguno de sus ahorradores desea que quiebre, pero cada uno de ellos, por temor, saca de allí su dinero, y entonces el banco efectivamente quiebra, contra todo pronóstico.
- El comportamiento que emerge no depende de ningún objeto en particular. Los objetos pueden tener una cierta variabilidad de características, no todos son iguales, pero cuando se agrupa una colección cualquiera de estos objetos, emerge el mismo fenómeno. Por ejemplo, en un río a veces se forman remolinos. El remolino es un patrón que permanece en el sitio, aunque las moléculas de agua que lo conforman entran y salen en un flujo continuo, es decir, son distintas en cada instante de tiempo. Esta idea está muy bien desarrollada en el libro *Sistemas Emergentes* de Steven Johnson¹⁹, donde también se explica que los barrios de ciertas ciudades se especializan en cierto tipo de comercio (Calle de Libreros, Rivera de Curtidores, etc.) y ese patrón permanece durante cientos de años a pesar de que la gente muere y nace entre medias. Con los hormigueros pasa algo similar, pues suelen durar alrededor de diez años, siendo que cada hormiga no suele superar los dos años de vida; y el hormiguero pasa por fases de juventud, donde es muy proclive a atacar a otros hormigueros, y madurez, donde prefiere mantenerse en paz alejado de problemas.
- El futuro de un sistema depende de su historia. La historia de un sistema complejo es irrepetible, por lo que poco se puede aprender de ella para predecir el futuro. Por ejemplo, la teoría de la evolución de Darwin explica muy bien cómo surgen las diferentes especies. Se puede hacer un análisis *a posteriori* de las mutaciones que dieron lugar a cambios en los seres vivos y se pueden trazar árboles filogenéticos. Pero, a pesar de conocer bastante bien el pasado, no podemos predecir que nuevos animales o plantas aparecerán en un futuro. Es más, si sembramos un planeta virgen similar al nuestro con las moléculas básicas de la vida, es imposible que se repita el mismo árbol filogenético de la Tierra. No hay garantías de que surjan dinosaurios y, si lo hacen, no hay garantías de que se extingan como ocurrió aquí para dar paso a las aves y permitir el amplio desarrollo de los mamíferos.

19 Que dice muy poéticamente que una ciudad, al igual que un remolino en el agua, es un patrón que se mantiene en el tiempo.

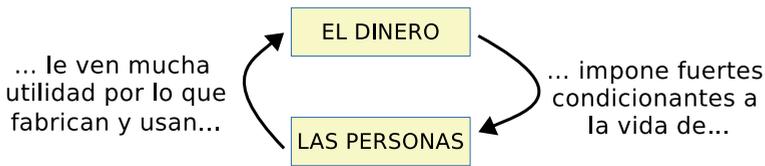


Figura 27. El dinero emerge de la interacción de las personas

Un ejemplo de emergencia más sofisticado es el dinero. Todos sabemos que el dinero es solo papel. Pero entonces, ¿por qué le damos tanta importancia? ¿Por qué no lo destruimos, en vez de ser sus esclavos? La respuesta es porque se trata de un sistema que se automantiene por realimentación positiva (Figura 27).

Podemos imaginar que el primer billete fabricado en el mundo nadie lo tomaría por otra cosa que un papel. Lo podríamos romper sin ninguna consecuencia. Pero conforme la gente lo va aceptando como algo valioso, se convierte en algo valioso. Es una realimentación positiva, porque cuantas más personas acepten el valor del dinero, todavía más personas se verán obligadas a hacerlo. A esto también se le llama una profecía autocumplida.

Una vez que el dinero es ampliamente aceptado por la mayoría de las personas, destruir mi dinero me pone en una situación de inferioridad frente a los demás. Por tanto, no lo voy a destruir y me toca imitar el comportamiento de la mayoría.

Además, aparecen instituciones creadas ex profeso, por y para el dinero, como los bancos y todo el sistema financiero. En este caso, la emergencia ya no solo es una cuestión subjetiva de reinterpretación del mundo, puesto que estos nuevos objetos²⁰ solo tienen sentido dentro del mundo que está naciendo.

Algo similar ocurre con la visión *newtoniana* de la gravedad, donde cada masa interactúa directamente con cada otra, comparada con la visión relativista de la gravedad, donde el espacio juega un nuevo papel como intermediario: las masas modifican la curvatura del espacio, y este modifica las trayectorias de las masas. Por cierto que esta última versión de la gravedad podría ser sustituida por otra de la Física Digital²¹, propuesta por Verlinde, que explica la gravedad como un fenómeno emergente a partir de la entropía, y que eliminaría de nuevo ese objeto intermedio (el espacio). Hay un blog de ciencia en español, Naukas, donde están los enlaces a los trabajos más importantes en este sentido (Villatoro, 2010).

20 Aunque siempre podemos pensar que los nuevos objetos se apoyan mutuamente en mostrar su realidad, de manera similar a como las palabras de un diccionario se definen mutuamente unas a otras.

21 *Digital Physics*.

Otro ejemplo similar, en Física Digital: según la teoría de cuerdas, el electrón dentro del átomo de hidrógeno es una vibración que interfiere constructivamente consigo misma. Las demás vibraciones se autoanulan porque son equivalentes a ondas que interfieren destructivamente. El electrón genera la única onda posible en una cierta órbita, y esa onda genera el electrón. Es una emergencia a partir de una realimentación positiva.

Otro ejemplo de emergencia ocurre cuando tu computador personal se bloquea. En el sistema operativo no existe una instrucción que diga:

`tiempo_que_falta_para_el_siguiete_bloqueo = 3204; # segundos`

El bloqueo ocurre por la interacción de programas con el sistema operativo, cada uno con distintos objetivos, que requieren más o menos recursos, memoria, o intercambio con la memoria virtual. No es fácil de prever cuándo ocurrirá o las razones exactas para ello, pero si se puede averiguar experimentalmente dónde está el umbral.

Prácticamente todo lo que existe es un fenómeno emergente de una u otra forma. Desde los átomos (que emergen a partir de hadrones y leptones) hasta los derechos humanos y sindicales (que solo aparecen cuando hay un nivel de riqueza y confort suficientes para permitir reflexionar y llegar a acuerdos, más allá de la mera supervivencia diaria). Cuando estás en un nivel previo a los átomos (la sopa de quarks y gluones que se supone se produjo después del Big Bang) es imposible predecir que ellos van a aparecer. Y los derechos humanos podrían desaparecer si el nivel anterior que los sustenta se vuelve demasiado frágil.

En el mencionado libro de Steven Johnson se analizan muchos más ejemplos, incluyendo la interacción de personas que conforman barrios y ciudades, que están vivos en cierto modo; la interacción de hormigas que producen un superorganismo que llamamos hormiguero; la interacción de neuronas que producen un cerebro con pensamientos, inteligencia y consciencia; y la interacción entre una gran cantidad de humanos a través de Internet que, según Johnson no produce nada porque en la época en que escribió el libro los enlaces web eran unidireccionales lo cual impide crear bucles de realimentación. Eso ya ha cambiado y hay realimentaciones por todos los lados. Por ejemplo, las páginas web más populares aparecen mejor *rankeadas* en los buscadores por lo que más gente todavía llegará a ellas. Los sistemas de calificación *peer-to-peer* en los blogs permiten ofrecer nuestra opinión en distintos tópicos y evaluar y ser evaluados por otros. En las redes sociales las personas con más contactos están más cerca de muchas otras personas con las que también pueden establecer contacto. Eso nos permite intuir que las relaciones entre tantas personas mediadas por Internet pueden dar lugar a la emergencia de un nuevo superorganismo,

o quizás varios, y seguramente ello ya ha ocurrido, pero ¿puede una célula percibir que existe un cuerpo al que pertenece?



Figura 28. Moho del fango en una finca cafetera del Quindío, Colombia

Por cierto que el libro de Johnson comienza analizando un organismo muy peculiar, el moho del fango²², que suele vivir como células aisladas la mayoría del tiempo, pero que cuando el entorno es adverso se agrupa y forma un cuerpo. Emerge un organismo pluricelular (Figura 28).

Este organismo se ha puesto muy de moda pues es capaz de resolver problemas de búsqueda de rutas óptimas, que sabemos que son de complejidad NP (Hanson, 2017). Lo hace sin tener un control central, usando reacciones químicas como sistema de comunicación entre sus células. El moho del fango logra encontrar la salida a laberintos porque consiste en muchísimas células que se comunican entre sí por medios químicos. Cada célula no tiene casi inteligencia, sino que esta emerge del conjunto.

Hay otra forma de salir de un laberinto: inundándolo de agua. Me subo a un flotador y dejo que la corriente de agua me arrastre hacia la salida, que es por donde el agua escapará. Si hay un camino largo pero cerrado al final, es decir, una especie de óptimo local, el agua no fluirá hacia allá de manera sostenida. O sea que el agua me sirve para solucionar un problema a pesar de que no puedo asignar ninguna inteligencia a sus moléculas. Podemos decir que la inteligencia es un fenómeno colectivo. Analizándolo un poco más vemos que la interacción entre moléculas de agua es por choques junto con la gravedad que guía todo el proceso. Usamos el mundo físico como

²² *Slime mold.*

computador, de la misma manera que veremos en el siguiente capítulo que lo hacía Gaudí, para calcular la estructura de su catedral. O como estamos usando los nuevos computadores cuánticos.

Otro caso de inteligencia colectiva lo viví como director de programa. Resulta que los reglamentos de la universidad contienen inconsistencias y vacíos. Y dado que hay muchos estudiantes, terminan encontrándolos, para sorpresa de los altos mandos. Es similar a pensar en un barco que tiene un pequeño agujero. Me explican que el agujero está en un sitio muy complicado, en una zona de difícil acceso y que prácticamente no se ve, por lo que es muy improbable que alguna molécula de agua lo encuentre. Disiento. Y el barco, obviamente, se irá a pique. Cuando hay muchos estudiantes pasa lo mismo.

Hay infinidad de casos donde surge algo imprevisto de la interacción entre individuos. Vamos a ver ahora el modelo de segregación de Schelling, que muestra emergencia, en este caso de algo tan malo como la discriminación social, a pesar de que todos los individuos que interactúan son bastante amigables. En Hart (2017) se puede jugar con una versión interactiva de este modelo, que consiste en una cuadrícula. En cada casilla puede haber un individuo o puede estar vacía. Hay dos tipos de individuo (por ejemplo, de dos estratos sociales distintos, razas o equipos de fútbol) y todos ellos tienen una preferencia de vecindad. Para entendernos, si la preferencia es 20% eso significa que cada individuo mira a sus vecinos inmediatos y es feliz si al menos el 20% son del mismo tipo que él. Los agentes que no son felices se cambian a alguna de las casillas vacías. El proceso se repite hasta que todos los individuos sean felices.

Este porcentaje de preferencia de vecindad es común a toda la población y, para aclarar las ideas, mencionemos que una preferencia de vecindad del 50% significa que todos los individuos son felices si hay una mezcla homogénea de tipos de individuo, es decir, si la mitad de mis vecinos son como yo y la otra mitad son distintos a mí. Es decir, ese es el ideal de una sociedad sin segregación. Sin embargo, por paradójico que pueda parecer, la dinámica del modelo amplifica la segregación. Incluso con porcentajes de preferencia de vecindad tan bajos como el 30% (es decir, soy tan abierto que admito a un 70% de vecinos distintos a mí) y con una población colocada al azar en la cuadrícula, después de iterar aparecen grandes zonas de un tipo de individuos, aisladas de otras grandes zonas del otro tipo, alcanzándose valores de segregación totales del 56%. Y si partimos de un 50% de segregación en el individuo, se alcanza hasta un 80% en el conjunto de la sociedad. El fenómeno es parecido al de la langosta que hablábamos antes, pues cuando un vecino cambia de sitio conduce a que otros vecinos también cambien.

Para ilustrar lo que es una transición de fase se recurre muchas veces a los relojes de manillas que actualmente, giran en sentido dextrógiro (hacia la derecha cuando pasan por arriba). En los primeros modelos de los siglos X al XIII existían las dos versiones, dextrógiros y levógiros. Sus precursores, los relojes de sol, también existían en las dos versiones que cambiaban de sentido según fueran de pared (verticales, dextrógiros) o de mesa (horizontales, levógiros). En el hemisferio sur de la Tierra se comportaban exactamente al revés. Ambas versiones eran igual de buenas y exactas. ¿Por qué finalmente triunfaron los dextrógiros? La respuesta es decepcionantemente simple: por azar. Una vez que aparece una pequeña desviación en la cantidad de relojes de uno u otro tipo, se autoamplifica como un fenómeno de realimentación positiva: cuanta más gente aprendía a leer un reloj dextrógiro enseñaban a otra gente a hacerlo así. Cuantos más relojeros aprendían a fabricar y reparar relojes de un tipo, más relojes surgirían de ese tipo, lo cual produce una transición exponencial. Algunas de las piezas, como los resortes y los trinquetes, no son intercambiables entre los dos tipos de relojes sin hacer grandes cambios al resto del mecanismo, de modo que una vez que aparece una tendencia, es más económico unirse a ella. Los físicos lo llaman ruptura de simetría y los cibernéticos, bifurcaciones. Las condiciones iniciales permiten varias posibilidades, pero una vez que por azar se ha decidido avanzar hacia una, es muy costoso dar reversa para intentar llegar a la otra.

Aunque la emergencia siempre nos sorprende, se pueden identificar en abstracto algunos mecanismos que la producen y que, en el fondo, son el mismo:

- La emergencia se produce porque aparece un bucle de realimentación positiva que lleva al sistema a un comportamiento nuevo. Después de un tiempo, algo se agota y un bucle de realimentación negativa toma el control, estabilizando al sistema. Ha aparecido algo nuevo y se ha estabilizado. (Por cierto, si no aparece el bucle negativo, el sistema morirá).
- La emergencia se produce como consecuencia de procesos acumulativos no lineales (caóticos). En sistemas lineales se da que $f(a+b) = f(a) + f(b)$. En sistemas no lineales, aparecen términos nuevos. Las ecuaciones suelen ser no resolubles o no computables en tiempo finito, con lo que el resultado final siempre es una sorpresa.

Cada vez que emerge un nuevo nivel ontológico, lo hace porque una realimentación negativa lo estabiliza. Desde allí puede emerger otro nivel, y desde allí otro, de manera indefinida, hasta que los recursos se agoten. Pero solo uno de ellos tiene libertad (en ese nivel es que ocurre “la vida”) y es

habitualmente el último (aunque no siempre²³) pues no se puede construir algo si la estructura de la que se parte es imposible de predecir. En el capítulo “Libertad” hablaremos un poco más de ello.

Si el nivel actual es determinista, se pueden usar las “leyes” que ofrece para construir otro nivel por encima. Incluso si es aleatorio donde se pueden sacar promedios, también se puede generar otro nivel de complejidad superior. Pero si es aleatorio “salvaje”, no hay ninguna posibilidad de predecirlo y, por tanto, no puede emerger nada estable basado en ese nivel.

Actualmente somos muchos seres humanos y tenemos muchas conexiones gracias a Internet, por lo que se especula²⁴ que ya debe estar emergiendo el siguiente nivel, al que podemos llamar algo así como *Gaia Inteligente*. Y para que surja como entidad independiente, necesita que los niveles inferiores (nosotros, los humanos) funcionen de forma predecible, o sea, sin libertad. Por ello se puede especular que la consciencia de los humanos va ser un fenómeno transitorio ya que es una realimentación que nos da libertad (miro lo que hago y tomo decisiones para hacer cambios en comportamientos futuros, como veremos en detalle en el capítulo sobre la consciencia). Un sistema sin realimentaciones es muy predecible, y con realimentaciones deja de serlo, de manera que nuestra libertad y consciencia humanas son un obstáculo para que se desarrolle *Gaia Inteligente*.

GENERADOR DE COMPLEJIDAD EVOLUTIVO

Habitualmente los algoritmos evolutivos (como los presentados en el libro anterior) se han usado para resolver problemas de ingeniería y de diseño, utilizando la aptitud para guiar la evolución hacia una solución con ciertas características deseadas. Pero también se pueden usar para generar complejidad, como veremos a lo largo de este capítulo.

Una sorprendente limitación de los algoritmos evolutivos tradicionales es que como la función de aptitud es fija y se pone de antemano para guiar a una solución, la emergencia (de soluciones compatibles con lo que buscamos) ocurre solo una vez. Por ejemplo, si queremos diseñar una silla resistente, económica y ergonómica entonces partimos de una población de

23 Por ejemplo, Dennett (1999) explica que en un autómata celular se puede implementar un algoritmo distribuido que juegue al ajedrez. A alto nivel, si le ofrezco mi reina a cambio de un peón, sé que el algoritmo se comerá la reina. Mientras que a bajo nivel el autómata celular es muy difícil de predecir a largo plazo. Lo habitual es al revés (el alto nivel tiene libertad, y el bajo nivel no), pero lo general es que solo uno de los niveles tenga libertad.

24 No solo en ciencia ficción como la *Skynet* de *Terminator* y Clarke (1979).

cromosomas generados al azar que codifican posibles sillas, con materiales, número y disposición de patas, y forma del respaldo y asiento. Las primeras sillas son un desastre debido a que son aleatorias (por ejemplo, tendrán 7 patas, algunas hacia arriba o con el asiento en vertical). Esas sillas tendrán muy baja funcionalidad y ergonomía, de modo que su aptitud será pequeña y tendrán pocos hijos. Con el paso del tiempo, las sillas que por mutación o cruce descubran formas más afortunadas, tendrán más hijos. Y al final podremos decir que emergió un nuevo objeto, la silla, con las propiedades que buscamos. Quizás sean sillas vulgares de 4 patas, asiento y respaldo o quizás la evolución encuentre otras formas más cómodas y funcionales. Pero en cualquier caso emerge un objeto útil. Desgraciadamente, si dejamos la evolución en marcha más tiempo no va a emerger nada más. No nos va a sorprender con un sillón, un sofá o un sofá-cama, porque en la especificación de la aptitud deseable no hemos puesto que sea mullido (que nos llevaría al sillón), que pueda ser ocupado por más de una persona (que nos llevaría al sofá) o que pudiera tener otras funciones extra (que nos llevaría al sofá-cama). Los requerimientos que no estén explícitos en la función de aptitud nunca se van a tener en cuenta. Y si los ponemos todos de una vez obtendremos de nuevo un único nivel de emergencia (el sofá-cama) sin pasar por niveles de emergencia intermedios ni soñar con que pueda producir niveles de emergencia en un futuro (como un diván, un colchón de agua, una silla para automóvil, etc.).

La emergencia solo ocurre una vez. Pero eso no es lo que vemos en los sistemas biológicos. ¿Qué es lo que falla entonces en nuestros algoritmos evolutivos? Se han hecho dos propuestas para superar esta limitación: la coevolución (Goldberg, 1989; Mitchell, 1999) y la supresión de la aptitud (EPlex Group, 2017).

Tenemos explicada la coevolución en el libro anterior. Recordemos que la idea principal es aumentar poco a poco la complejidad del problema, para que la solución buscada también lo haga. En el último ejemplo primero pediríamos (calculando adecuadamente la aptitud) que la silla sea funcional (que no se rompa, que no se caiga) y cuando la población de sillas alcance este requerimiento entonces pediríamos que también sea ergonómica (adaptada a las medidas de una persona), y luego que también sea cómoda (empleando materiales mullidos). Esto es laborioso, requiere mucha intervención del programador humano y, por tanto, es poco general, poco práctico.

La otra posibilidad, suprimir la aptitud, consiste en dejar grandes periodos de tiempo donde la evolución solo genere variedad, sin ninguna presión selectiva orientada a cumplir requerimientos. A lo sumo se puede considerar una aptitud que reproduzca más a los cromosomas más raros, más

diversos, más distintos al promedio. Una vez que se tiene una población muy variada se continúa la evolución con la aptitud tradicional, orientada a satisfacer requerimientos.

Y hay una tercera propuesta que es mixta entre las dos anteriores: coevolución sin una finalidad explícita. Por ejemplo, podemos modelar predadores y presas en un espacio plano sobre el que se pueden mover. Si un predador y una presa se encuentran en las mismas coordenadas espaciales, el primero devora al segundo. Y si un predador permanece mucho tiempo sin comer, entonces muere. Por ello, aunque no esté explícitamente codificado en el programa, el objetivo de los predadores será acercarse a las presas para comérselas, y el objetivo de las presas será huir de los depredadores. Esto dará lugar a una serie de emergencia de estrategias de los predadores y de las presas, para cumplir con sus objetivos implícitos.

Sin embargo, todos estos métodos tienen una gran limitación que quiero ilustrar con los dos ejemplos usados: una sala de teatro es, básicamente, un conjunto de sillas dispuestas de cierta forma; esto jamás emergerá de un algoritmo evolutivo tradicional, ni con las variantes que acabamos de explicar, debido a que la estructura del cromosoma es fija y no permite ir más allá de patas, asiento y respaldo. Y respecto a los predadores y presas, a la presa jamás se le ocurrirá generar un par de alas y huir volando porque en su cromosoma no están codificadas; podrá correr en zig-zag, alargar el tamaño de las patas y cosas similares siempre y cuando tenga genes que lo codifiquen. Pero las alas son imposibles porque no existen esos genes inicialmente.

Queda así identificado el problema: los cromosomas son diseñados por el programador como una secuencia fija de genes que codifican cosas relevantes a la solución buscada. Pero son fijos. Si al programador se le olvida algo, no hay nada que hacer. El algoritmo evolutivo no puede inventar un gen para las alas de la presa. La naturaleza es dinámica mientras que los cromosomas de nuestros algoritmos son estáticos.

Hay varias formas de solucionar este problema, pero una muy interesante y general está descrita en el libro *Ocho hitos de la evolución* de John Maynard Smith y Eörs Szathmáry. No me entiendan mal, pues se trata de un libro sobre biología, no sobre programación. Pero lo que Maynard y Szathmáry describen en cada uno de los hitos es exactamente el mismo algoritmo, si uno sabe interpretarlo adecuadamente. Veamos cómo es.

Su idea es que la evolución consiste principalmente en un proceso competitivo tal y como explica otro neodarwinista como Dawkins en *El gen egoísta*. Esto casa perfectamente con el concepto de optimización que empleamos en ingeniería: las garras del predador se van haciendo más afiladas y las patas de la presa más rápidas conforme pasa el tiempo, porque con ello

mejoran sus capacidades de supervivencia, con lo que tendrán más hijos con cualidades similares respectivamente, lo cual lleva a un proceso de mejora paulatino.

Sin embargo, Maynard y Szathmáry identifican también ocho saltos discontinuos en ese proceso de mejora continua (que, por cierto, se corresponden a la idea de equilibrio puntuado de Niles Eldredge y Stephen Jay Gould, y que había generado tantas polémicas entre biólogos gradualistas y saltacionistas, ambos evolutivos). Estos saltos son:

- De moléculas replicantes aisladas, a encerradas dentro de membranas.
- De replicadores independientes, a asociados en un mismo cromosoma.
- Del mismo *ARN* actuando como gen y encima, a la separación de su trabajo en *ADN* y proteína.
- De la célula procariota, a la célula eucariota.
- De la reproducción asexual (clonado de una única célula), a la reproducción sexual (fusión de dos células).
- De los protistas (individuos unicelulares), a los animales, plantas y hongos (individuos pluricelulares).
- De los individuos solitarios, a las sociedades de individuos.
- De las sociedades de primates, a las sociedades de humanos por medio de la aparición del lenguaje.

El libro ya tiene 20 años y hay experimentos nuevos que corroboran y afinan con más precisión todo ello. Pero casi todas estas transiciones tienen un algoritmo común: se lograron por la cooperación de los individuos del nivel anterior. Los casos triviales de entender son el paso de seres unicelulares a multicelulares o el paso de individuos aislados a individuos que viven en sociedad. Pero también las células eucariotas se formaron por asociación de bacterias (y prueba de ello es que estas se convirtieron en estructuras internas de aquellas, como los cloroplastos, núcleo, membrana, mitocondrias etc. y muchas de ellas todavía conservan vestigios de sus propios genes). Lynn Margulis (1998) lo explica muy bien en su libro *¿Qué es el sexo?*

El algoritmo que descubrieron Maynard y Szathmáry alterna momentos de competencia, donde se optimizan las funcionalidades de los individuos, con momentos de cooperación, donde los individuos se asocian para formar algo más complejo. Es gracias a la cooperación que emergen nuevos niveles de individuos formados por asociación de los del nivel anterior. El proceso es iterativo.

El algoritmo que propongo para modelar este proceso consiste en los siguientes cinco pasos:

1. Autocopiado. Un individuo logra la capacidad de sacar copias de sí mismo.
2. Competencia. Gracias al autocopiado, aparece una familia de individuos muy parecidos pero no idénticos, pues siempre habrá pequeños errores en las copias que hacen que la población evolucione. Como usan los mismos recursos, habrá un proceso de competencia que produce cada vez mejores funcionalidades.
3. Agrupación. Por accidente aparece algún tipo de membrana o pegamento o ligazón que los agrupa en un “superorganismo”. Puede ser que uno quede dentro de otro, que un fenómeno físico los aisle, etc.
4. Cooperación. La nueva unidad solo se reproduce y vive con ventajas frente a otros si todos sus individuos internos colaboran.
5. Especialización. Inicialmente todos los individuos son iguales dentro del superorganismo. Pero con el paso del tiempo, las mutaciones (errores de copia) hace que se diferencien. Es ventajoso que se especialicen en hacer cada uno una cosa diferente, pero siguen colaborando. De hecho, ya no pueden dejar de colaborar, pues dependen físicamente unos de otros.

Para poder iterar, regresando al paso número 1, se requiere que el superorganismo retenga su capacidad de autocopiado, quizás porque sus individuos se siguen replicando y luego vuelven a asociarse, o quizás porque descubre una nueva forma de replicarse como un todo.

Los algoritmos evolutivos clásicos implementan únicamente los pasos 1 y 2 que constituyen lo que se conoce como evolución gradualista. El paso 3 de agrupación es el que fabrica individuos con nuevas estructuras genéticas. El paso 4 de cooperación podría no darse, pues es un fenómeno difícil (y seguramente por eso, a lo largo de los 4.100 millones de años de vida en la Tierra, solo se ha dado esas ocho veces). En el capítulo “Vida” estudiaremos la cooperación más detenidamente. Pero si se da la cooperación, el paso 5 de especialización es inevitable, pues las mutaciones internas producen individuos ligeramente distintos, y la evolución a nivel superior presionará para que cada uno haga lo que sabe hacer lo mejor posible. Es decir, se especializará. Y una vez que ello ocurra, no tiene vuelta atrás, porque se producen dependencias mutuas. Por dar un ejemplo con humanos viviendo en sociedad: nada impide que un individuo fabrique sus zapatos, sus muebles, coseche su comida y levante su casa, como Robinson Crusoe. Pero ello es costosísimo en tiempo, dinero y calidad. Es mucho más eficiente que el zapatero fabrique zapatos, el carpintero los muebles, el panadero pan, el arquitecto levante las casas, y todos intercambien el resultado de su trabajo

con los demás. Es costoso que cada persona tenga todas las herramientas del carpintero, del panadero y del arquitecto. Es costoso intelectualmente que sepa usarlas bien. Y es dudoso que tenga tiempo para hacer tantas cosas.

Además, como decíamos, una vez que surge la especialización no suele tener reversa porque cada ente es incapaz de realizar todos los procesos que se requiere para mantenerse vivo, ya que delega ciertas funciones en otros entes. Este es uno de los trinquetes²⁵ de la evolución²⁶. Por cierto que el otro trinquete de la evolución es la propia complejidad que genera: una mutación aislada es aproximadamente igual de probable que ocurra en un sentido o en otro, creando o destruyendo cierta funcionalidad. Pero cuando ocurre una mutación afortunada suele abrirse un nuevo espacio de diseño que favorece muy rápidamente una cascada de mutaciones adicionales. Deshacer tantos cambios y tan interdependientes es muy improbable y costoso. Por poner una metáfora, si decides cambiar de domicilio ello favorece también que compres nuevos muebles adaptados a las dimensiones de tu nueva casa, hacer nuevos amigos en el barrio, modifiques tus rutinas de compras y de paseo, etc., con lo que se complica muchísimo deshacer la acción inicial (en el sentido de que la evolución no elige rutas costosas).

Por último, que el organismo retenga la capacidad de autocopiado no es obvio, aunque existen varias formas de lograrlo, que se analizarán en el capítulo “Vida”.

Este algoritmo tiene la ventaja de que su futuro está abierto, muy al contrario de los algoritmos evolutivos tradicionales. Pueden emerger sucesivos niveles de complejidad cada vez que se repiten las fases de 1 a 5. Y la complejidad que genera no es predecible, principalmente porque en la fase de agrupamiento hay muchas formas de realizarlo. Es un proceso combinatorio. Por ejemplo, no es necesario que todos los entes que se agrupen sean homólogos, ni siquiera del mismo nivel: un retrovirus puede “agruparse” con un mamífero; una persona puede prestar servicios a una empresa sin pertenecer a ella; las células eucariotas probablemente se formaron como simbioses entre una célula metanogénica y una eubacteria, que finalmente desapareció en las arqueobacterias, o se transformó en hidrogenasa o en mitocondria en las eucariotas; todo el reino *Chromista*, donde cada individuo es una simbiosis de varios otros, cada uno con su propio ADN; la nanomia, que es un animal de mar formado como colonia a partir de varios animales distintos.

25 Mecanismo de engranajes que permite girar o transmitir fuerza en una dirección pero no en otra, por ejemplo, la transmisión de los pedales a la rueda trasera de la bicicleta. En inglés “*ratchet*”.

26 Por eso es que el Brexit es tan complejo, porque ya hay muchas dependencias mutuas difíciles de cortar.

RESUMEN

En este capítulo proponemos una forma de ver el mundo, a través de su complejidad. Conforme aumenta la complejidad aparecen fenómenos (inteligencia, consciencia, libertad e incluso realidad) que no son de todo o nada, sino que hay una cierta gradualidad en su expresión. A partir de ahora, en sucesivos capítulos, nos vamos a centrar en estudiar la libertad, la capacidad de cómputo universal, la autoorganización, la capacidad de sacar copias, la inteligencia y la consciencia.

Hemos visto algunas formas de medir la complejidad de un objeto, para lo cual hay que entresacar lo estructural y rechazar lo que dependa del azar. Todas las medidas de complejidad arrojan únicamente cotas superiores, pues siempre cabe dentro de lo posible comprimir más la información estructural. Con ello hemos visto la definición de bit, y que los físicos comienzan a considerar el mundo formado no solo por materia y energía, sino también de información.

Hemos hablado de las formas como el mundo genera complejidad a partir de muy poco. Los siguientes mecanismos generan complejidad a partir de la nada, o más bien, de la casi-nada:

- La referencia (que los objetos se puedan diferenciar) y la autorreferencia (un sistema que pueda decir cosas sobre sí mismo) aumenta muchísimo la complejidad porque se trata de una realimentación positiva, como se puede observar en el teorema de Gödel, los sistemas autorreferentes de Douglas Hofstadter y los fractales autosemejantes.
- La combinatoria en la agrupación de objetos. Una vez que los objetos agrupados interactúan entre sí, es trivial que aparezcan realimentaciones. Con la teoría de juegos se pueden estudiar las formas de interrelación.
- La realimentación (son las matemáticas más difíciles de las ingenierías). Suelen producir: caos (los sistemas de ecuaciones no lineales que producen caos no suelen tener solución analítica); fractales (curvas autosimilares); y leyes de potencias (distribución de probabilidades donde los eventos mayores ocurren pocas veces y los eventos menores ocurren muchas veces).
- La evolución para lo cual se requiere que los objetos puedan sacar copias de sí mismos. Y de los objetos que evolucionan puede emerger la cooperación.

Luego hemos hablado que la complejidad puede aumentar gradualmente (como cualquier proceso de optimización por búsqueda local), pero también

puede dar saltos (típicamente por procesos de realimentación positiva que generan exponenciales) e incluso puede disminuir (y hemos explicado cuando puede ocurrir esto).

Al final, propongo un algoritmo general para crear complejidad.

Quiero también dar una advertencia: no sabemos cómo funcionan los sistemas complejos. Es difícil predecir y controlar su comportamiento, así que debemos ser cautos. No hay nada tan peligroso como un burro con iniciativa. Por ejemplo, para aumentar el control sobre un sistema es habitual (pero equivocado) aumentar las restricciones (normas, leyes...). Esto suele ser un error ya que las restricciones interactúan entre sí de forma combinatoria, con lo cual aumenta la complejidad e impredecibilidad del sistema. Además, al aumentar el número de restricciones (normas, leyes) por encima de un cierto nivel, es casi seguro que se producirán contradicciones entre ellas. Un individuo hábil puede lograr cualquier cosa de un sistema así. En ese caso observaremos la emergencia de algo nuevo e inesperado. No olvidar que los sistemas complejos son realmente complejos.

Para saber más

En los últimos años se ha escrito mucho y de mucha calidad sobre complejidad. Recomiendo leer los siguientes libros, la mayoría de los cuales son muy amenos.

- Steven Johnson (2003). *Sistemas emergentes*. México: Fondo de Cultura Económica.

Es un libro espectacular. Su tesis principal es que una hormiga en un hormiguero hace lo mismo que una neurona en un cerebro y que una persona en una ciudad. Si lo lees, cambiará tu mente. En el último capítulo explora si Internet es un sistema suficientemente complejo para poder decir que tiene vida propia y este es el único aspecto donde se queda un poco corto.

- James E. Lovelock (2000). *Las edades de Gaia*. Barcelona: Tusquets Editores.

El libro es fascinante. Cuenta cómo es posible detectar si hay vida en un planeta examinando los gases de su atmósfera. Hay muchos datos biológicos interesantísimos y poco conocidos, sobre procesos de autorregulación del planeta Tierra. Entre ellos, está el *software* DaisyWorld como modelo para explicar cómo se ha mantenido constante la temperatura de nuestro planeta. Explica la verdadera razón de que el agua de los planetas desaparezca con el tiempo (y no, no es porque te dejes la llave abierta, pues eso solo genera un problema económico, pero no ecológico en primera instancia). Cuenta

que encontraron un reactor nuclear natural (biológico) y la historia de que el oxígeno es un veneno peligroso. Muchos problemas actuales dejarían de serlo si se mantiene la población humana por debajo de 500 millones.

- John Maynard Smith y Eörs Szathmáry (2001). *Ocho hitos en la evolución. Del origen de la vida a la aparición del lenguaje*. Barcelona: Tusquets Editores.

La evolución procede lentamente, pero a veces da saltos que producen cambios drásticos (nuevas estructuras con mayor complejidad). Los autores muestran cuáles han sido esos cambios en biología. Es un libro muy sugerente para quien pretende abordar el problema de la emergencia de la complejidad desde el punto de vista computacional. Requiere unas bases mínimas de biología.

- William Irwin Thompson, Gregory Bateson, Francisco Varela, Humberto Maturana, James Lovelock, Lynn Margulis, Henry Atlan, John Todd y Hazel Henderson (2001). *Gaia: una teoría do conhecimento*. São Paulo: Editora Gaia Ltda.

Un libro que reúne a los más sobresalientes investigadores en el tema de los sistemas complejos. Analiza muchos sistemas ecológicos usando la teoría de la complejidad. Analiza también problemas de política y de economía (principalmente la globalización), como sistemas complejos. Es un libro extraordinario pues su primera edición es de 1987 y allí se predicen cosas que vemos hoy día cumplidas. Está en portugués, pero hay versiones en inglés y en español.

- José Navarro Cid (2001). *Las organizaciones como sistemas abiertos alejados del equilibrio*. [Tesis Doctoral]. Barcelona: Facultad de Psicología de la Universidad de Barcelona.

Una aplicación de la complejidad y la emergencia a problemas de organizaciones humanas. La primera parte contiene una muy clara y valiosa introducción a los conceptos de teoría general de sistemas, teoría de la complejidad, realimentaciones positivas y negativas, retardos, emergencia, complejidad, caos y fractales. Cita los trabajos de Stuart Kauffman, Mandelbrot, Prigogine, Maturana y Varela.

- M. Mitchell Waldrop (1992). *Complexity*. New York: Simon & Schuster.

Da una descripción histórica de lo que fueron los primeros desarrollos científicos modernos en el área de la complejidad. El libro ha quedado anticuado por cuanto el área se ha desarrollado mucho, pero tiene interés por-

que plantea las preguntas básicas, y cuenta las historias de las personas que hubo detrás. Es parecido al libro de Lewin.

- Roger Lewin (1992). *Complexity: Life at the edge of chaos*. New York: MacMillan Publishing Company.

También da una descripción histórica de lo que fueron los primeros desarrollos científicos modernos en el área de la complejidad. El libro ha quedado anticuado por cuanto el área se ha desarrollado mucho, pero tiene interés porque plantea las preguntas básicas, y cuenta las historias de las personas que hubo detrás. Es muy parecido al libro de Waldrop, y para mí es un misterio por qué se escribieron a la vez dos libros tan similares.

- Murray Gell-Mann (1996). *El Quark y el Jaguar*. Barcelona: Tusquets Editores.

Gell-Mann, premio nobel de física, fue uno de los pioneros en abordar el problema de la complejidad, esto es: ¿cómo ocurre que la reunión de muchas cosas simples (como los quarks) pueden dar lugar a algo increíblemente complejo (como un jaguar)? Fue el primer director del Instituto de Santa Fe, uno de los primeros centros de investigación en el tema de la complejidad.

- Stuart A. Kauffman (2000). *Investigations*. New York: Oxford University Press.

El libro es altamente especulativo, pero muy sugestivo. Se requiere una cuarta ley de la termodinámica para explicar la vida, y el autor trata de aproximar cómo podría ser esa ley, intentando explicar la creatividad del universo, la emergencia de nuevos entes y propiedades. Muestra una perspectiva donde todas las leyes del universo, y el mismo espacio-tiempo, son resultado de procesos evolutivos (Smolin). Habla de los teoremas de *No-Free-Lunch* y del *halting problem* aplicado a la química (no tiene nada de raro, pues la química también son algoritmos). Habla de leyes de potencias (fractales), criticalidad autoorganizada, coevolución, astrobiología, *SETI* y una nueva área: la teoría general de la biología. Comenta la famosa cita a Huxley: “la cosa más extraña de la teoría de la evolución es que todo el mundo cree que la entiende”. Filósofa sobre la ciencia, citando a Poncaire, Wittgenstein, Pierce, Dennett, Hume, Pareto, Gödel, Feynmann, Smolin, Rawls (con su justicia evolutiva). Presenta el *software ALCHEMY* de Walter Fontana donde pueden observarse 3 niveles de emergencia. Utiliza una idea suya, las redes booleanas estocásticas, para simular genes. Comenta el trabajo de Bak sobre criticalidad autoorganizada en montones de arena. Muestra que el problema *KSAT* (que es NP) tiene una transición de fase. Da una idea brillan-

te de cómo resolver el *job shop scheduling* manteniendo el problema en estado de percolación (en el filo del caos), que usamos en EVALAB en el 2009, en el trabajo de grado de la estudiante María Alejandra Céspedes. Muestra, al igual que tantos otros, que la economía es un proceso evolutivo. Habla de la teoría de los *spin networks* de Roger Penrose, para mostrar cómo puede crearse el espacio-tiempo. Algunas páginas (pocas) deben de saltarlas los estudiantes de informática, pues están escritas en un lenguaje para químicos, impenetrable. De la página 254 en adelante no merece la pena ser leído por un estudiante de informática puesto que explica de manera muy superficial y atropellada la teoría de cuerdas y de *M-branas*. Hay cierta intersección entre los todos los libros de Kauffman, pero merecen la pena ser leídos.

- Stuart A. Kauffman (1993). *The origins of order. Self-organization selection in evolution*. New York: Oxford University Press.

La evolución no puede explicar satisfactoriamente cómo apareció la primera molécula autorreplicante. El autor nos muestra que el proceso es matemático (lo llama autoorganización en el filo del caos) y ocurre inevitablemente. Habla de los paisajes adaptativos rugosos, que se encuentran cuando empleamos algoritmos evolutivos. Muestra la similitud que hay entre los modelos de *spin-glass* en física con los algoritmos evolutivos. El trabajo del autor siempre está enfocado en el dominio de la química prebiótica, tratando de mostrar como surgen espontáneamente reacciones químicas autocatalíticas. Habla también de caos, atractores, cuencas de atracción y su trabajo principal, que son las redes booleanas estocásticas. Muestra como estas redes pueden aprender, utilizando técnicas evolutivas. Compara lo anterior con las redes neuronales. Habla del famoso *software* Tierra, de Tom Ray y las gramáticas aleatorias. Nos recuerda que Turing realizó un estudio que casi se pierde, sobre generación espontánea de patrones espaciales (manchas en la piel de los animales). De la página 407 en adelante habla sobre biología molecular de una manera muy técnica, por lo que no merece la pena leerse (a los biólogos les puede interesar, pero a los informáticos no).

- Ian Stewart (1998). *El segundo secreto de la vida*. Barcelona: Editorial Crítica.

Muestra el programa “Ameba”, una sopa de código aleatorio con mutaciones. Habla del poco conocido trabajo de Turing de computación descentralizada, para simular la creación de manchas en la piel de los animales. También de autómatas celulares, autoduplicación de Von Neumann, complejidad, evolución, emergencia, formas matemáticas de las plantas.

- Christoph Adami (1998). *Introduction to Artificial Life*. New York: Springer-Verlag.

Es un libro fácil de leer y toca casi todos los temas que vemos aquí. Habla sobre complejidad, entropía, información, información mutua, autocopía, virus... Explica muchos sistemas de vida artificial (Tierra, Avida, Amoeba, creatures de Karl Sims, autómatas celulares de von Neuman, Wolfram y Langton...). Habla de computabilidad de Turing, información algorítmica de Chaitin, caos y algo sobre biología.

- Carlos Eduardo Maldonado *et ál.* (2007). *Complejidad: ciencia, pensamiento y aplicación*. Bogotá: Universidad Externado de Colombia.

Escrito por varios investigadores, algunos de muy alta calidad. Hay artículos muy interesantes sobre caos en las redes de comunicaciones, medidas de complejidad, fractales, multifractales, un nuevo algoritmo para modelar sistemas fractal-multifractal, Prigogine, Gödel... Pero también deriva en cosas esotéricas y trabajos en temas que nada tienen que ver con la complejidad.

- Ilya Prigogine e Isabelle Stengers (1990). *Entre el tiempo y la eternidad*. Madrid: Alianza Editorial.

El premio nobel de química Ilya Prigogine ha escrito muchos libros divulgativos (*La estructura de lo complejo*, *¿Tan solo una ilusión?*, etc.), pero todos hablan de lo mismo con ligeras variaciones. Prigogine ha trabajado en el tema de sistemas complejos abordándolo desde conceptos físicos básicos (termodinámica de sistemas en desequilibrio). Muestra muchos ejemplos de sistemas caóticos (incluyendo la famosa reacción de Belousov-Zhabotinsky) y considera que todo el universo es evolutivo.

- Heinz R. Pagels (1991). *Los sueños de la razón*. Barcelona: Gedisa.

Explica diversas medidas de complejidad, fractales, el número de Feigenbaum, caos y aleatoriedad. Considera también los aspectos filosóficos y sociales.

- W. Brian Arthur (1990). Positive Feedbacks in the Economy. *Scientific American*, pp. 92-99, February 1990.

Es el primer economista que no cree en las ecuaciones de la economía clásica. Sus modelos no lineales predicen mejor el comportamiento de los mercados. Procede del Instituto de Santa Fé.

REFERENCIAS

Libros, artículos y enlaces web

- 20Qnet (2017). *20Q.net. The neural net on internet*. Recuperado el 2 de febrero de 2017. Disponible en: <https://goo.gl/pnoegz>
- Ashby, W. R. (1956). *An Introduction to Cybernetics*. Londres: Chapman and Hall.
- Atkins, P. W. (1992). *Cómo crear el mundo*. Barcelona: Editorial Grijalbo Mondadori.
- Barrow, J. D. (1999). *Imposibilidad. Los límites de la ciencia y la ciencia de los límites*. Barcelona: Gedisa Editorial.
- Bostrom, N. (2003). Are You Living in a Computer Simulation? *Philosophical Quarterly*, 53(211), pp. 243-255.
- Chaitin, G. J. (1992). *Information-Theoretic Incompleteness*. Singapore: World Scientific.
- _____. (1997). *Algorithmic Information Theory*. USA: Cambridge University Press.
- _____. (1997). *Information, Randomness & Incompleteness*. Papers on Algorithmic Information Theory. Singapore: World Scientific.
- _____. (1998). *The limits of mathematics*. Singapore: Springer-Verlag.
- _____. (1999). *The Unknowable*. Singapore: Springer-Verlag.
- _____. (2001). *Exploring Randomness*. London: Springer-Verlag.
- Clarke, A. C. (1979). «Marque F de Frankenstein». En *El viento del sol: relatos de la era espacial*. Madrid: Alianza Editorial, pp. 93-101.
- Dawkins, R. (1993). *El Gen Egoísta*. Barcelona: Salvat.
- DeDeo, S. (2018). *Information Theory for Intelligent People*. Recuperado el 25 de junio de 2018. Disponible en: <http://tuvalu.santafe.edu/~simon/it.pdf>
- Dennett, D. C. (1999). *La peligrosa idea de Darwin*. Madrid: Círculo de Lectores.
- EPlex Group (2017). *The Novelty Search Users Page*. Recuperado el 10 de abril de 2017. Disponible en: <https://goo.gl/ikyToR>
- Goldberg, D. E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company Inc.
- Goodwin, B. (1998). *Las manchas del leopardo*. Barcelona: Tusquets Editores.
- Hart, V. y Case, N. (2017). *Parable of Poligons. A playable post on the shape of the society*. Recuperado el 20 de abril de 2017. Disponible en: <https://goo.gl/wwgUcD>
- Hoffman, P. (2000). *El hombre que solo amaba los números*. Barcelona: Editorial Granica.

- Hofstadter, D. (1979). *Gödel, Escher, Bach: un eterno y grácil bucle*. Barcelona: Tusquets Editores.
- Mandelbrot, B. y Hudson, R. L. (2006). *Fractales y finanzas*. Barcelona: Tusquets editores.
- Margulis, L. y Sagan, D. (1998). *¿Qué es el sexo?* Barcelona: Tusquets Editores.
- Maturana, H. R. y Varela, F. J. (1973). *De máquinas y seres vivos*. Santiago de Chile: Editorial Universitaria.
- McKinnon W. B., Nimmo, F., Wong, T. *et ál.* (2016). Convection in a volatile nitrogen-ice-rich layer drives Pluto's geological vigour. *Nature*, 534(7605), pp. 82-85. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature18289>
- Miller, P. (2010). *The Smart Swarm: How understanding flocks, schools, and colonies can make us better at communicating, decision making, and getting things done*. New Jersey: Avery Publishing Group, Inc.
- Mitchel, M. (1999). *An introduction to genetic algorithms*. Cambridge: The MIT Press.
- Pattee, H. H. (2012). *Evolving Self-Reference: Matter, Symbols and Semantic Closure. From LAWS, LANGUAGE and LIFE: Howard Pattee's classic papers on the physics of symbols with contemporary commentary*, pp. 211-226. Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-007-5161-3_14
- Peña, B. (2002) *Inestabilidades de Turing en Sistemas de Reacción-Difusión*. [Tesis Doctoral]. Pamplona: Universidad de Navarra.
- Prigogine, I. (1997). *La estructura de lo complejo*. Madrid: Alianza Editorial.
- _____. (1997). *El fin de las certidumbres*. Madrid: Taurus.
- Prusinkiewicz, P. y Lindenmayer, A. (2004). *The Algorithmic Beauty of Plants*. New York: Springer-Verlag.
- Searle, J. (1997). *El misterio de la conciencia*. Barcelona: Paidós.
- Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, 27(4), pp. 623-656.
- Smaldino, P. E. y McElreath, R. (2017). The Natural Selection of Bad Science. *R. Soc. open sci*, 3, 160384. Royal Society Publishing. DOI: <http://dx.doi.org/10.1098/rsos.160384>
- Tsallis, C. (2000). *Entropic Nonextensivity: A Possible Measure of Complexity*. Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas. Rio de Janeiro: Santa Fe Institute Working Papers.
- Watts, D. J. (2010). *Seis Graus de Separação*. São Paulo: Leopardo Editora.
- Wissner-Gross, A. D. y Freer, C. E. (2013). Causal Entropic Forces. *Physical Review Letters*, 110(168702). DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.110.168702>

Películas y videos

- Bostrom, N. (2015). *What happens when our computers get smater than we are*. Recuperado el 16 de marzo de 2017. Disponible en: <https://goo.gl/wdjavs>
- Cameron, J. (1984). *Terminator*. USA: Orion Pictures.
- Chlebek, M. (2007). *Emergence*. Recuperado el 14 de abril de 2017. Disponible en: <https://goo.gl/qbNGfb>
- Connosco, A. R. (2011). *Emergence: Patterns on the Edge of Chaos - Introduction by Tiago Marques*. Recuperado el 2 de septiembre de 2017. Disponible en: <https://goo.gl/qRxKLU>
- Guaicoloro (2008). *Inestabilidad de Bénard Marangoni*. Recuperado el 26 de agosto de 2017. Disponible en: <https://goo.gl/bn8XrY>
- Hanson, J. (2017). *Are You Smarter Than A Slime Mold?* Recuperado el 3 de marzo de 2017. Disponible en: <https://goo.gl/n3pHkp>
- jNode (2016). *Structure Formation*. Recuperado el 2 de septiembre de 2017. Disponible en: <https://goo.gl/phF6St>
- Krauss, L. (2009). *Un universo desde la nada*. AAI web. Recuperado el 30 de abril de 2017. Disponible en: <https://goo.gl/fWyqmU>
- León, H. C. (2010). *Rayleigh Benard Convection, using a LB method on Matlab*. Recuperado el 2 de septiembre de 2017. Disponible en: <https://goo.gl/22GX5j>
- manf1234 (2017). *Self Organization*. Recuperado el 2 de septiembre de 2017. Disponible en: <https://goo.gl/zvdmYD>
- Openlb (2013). *Rayleigh Benard Thermal Convection Long Version*. Recuperado el 26 de agosto de 2017. Disponible en: <https://goo.gl/Gb5rwP>
- PaPookie (2006). *Pattern Formation in Nature*. Recuperado el 2 de septiembre de 2017. Disponible en: <https://goo.gl/LpkGX9>
- Ratcliff, W. C. (2014). *Experimental evolution of multicellularity*. Georgia Tech. Recuperado el 3 de mayo de 2017. Disponible en: <https://goo.gl/vteBGx>
- Reynolds, C. (1987). *Original 1986. Boids simulation*. Recuperado el 6 de mayo de 2017. Disponible en: <https://goo.gl/WAfYDA>
- Schoenfeld, I. (2013). *Introduction to Complex Systems: Patterns in Nature*. Recuperado el 2 de septiembre de 2017. Disponible en: <https://goo.gl/W3hG2E>
- Vila, C. (2010). *Nature by Numbers*. Recuperado el 2 de septiembre de 2017. Disponible en: <https://goo.gl/5bmRp9>
- Villatoro, F. R. (2010). *Todo es entropía*. NAUKAS. Recuperado el 12 de octubre de 2017. Disponible en: <https://goo.gl/utuJr3>

Tesis y trabajos de grado en EVALAB

Céspedes, M. A. (2008). *Incorporación de un parámetro fractal al algoritmo genético en problemas NP*. Cali: Universidad del Valle.

Gómez, J. A. (2001). *Desarrollo de una Máquina de Estados Finitos (FSM) evolutiva mediante algoritmos genéticos*. Cali: Universidad del Valle.

Mesa, N. (2014). *Framework para simulación de sistemas emergentes*. Cali: Universidad del Valle.