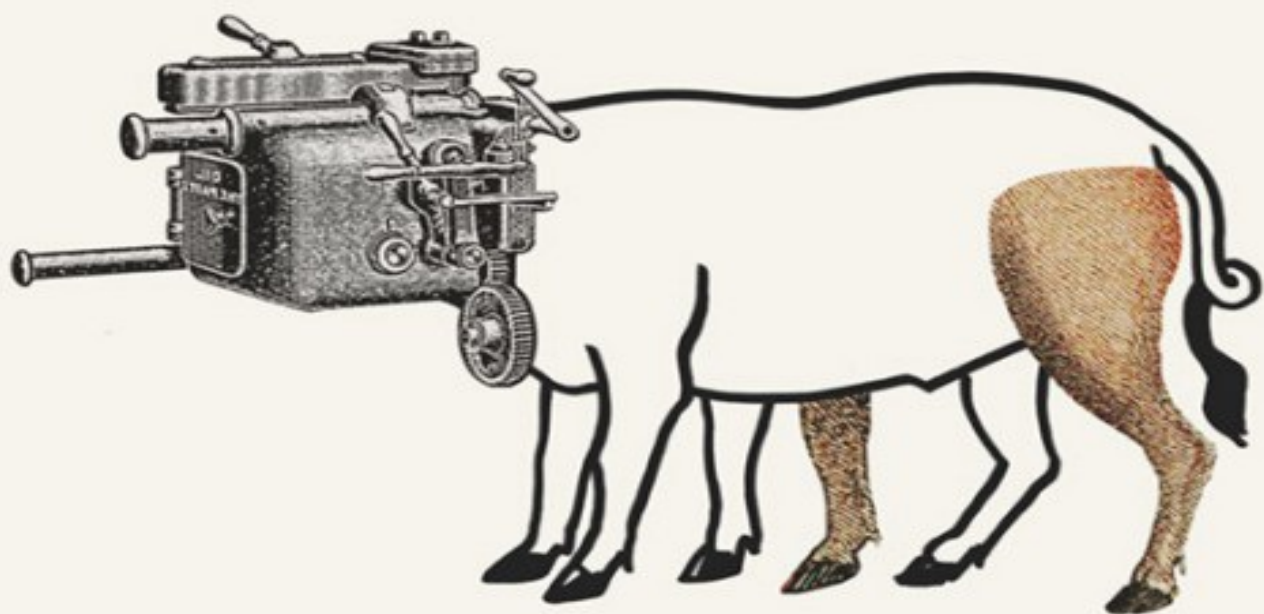


Ricard Solé

La lógica de los monstruos

¿Hay alternativas a la naturaleza tal como la conocemos?



Índice

Portada

Dedicatoria

Agradecimientos

Introducción. Lo esperable, lo inesperado

1. Turing encuentra a Darwin
2. El mundo perdido molecular
3. Cantos de sirena
4. Mentes posibles
5. Utopía(s)
6. Sobre gatos y universos
7. Desde el abismo oscuro

Apéndices

Referencias

Notas

Créditos



*

METATEMAS. LIBROS PARA PENSAR LA CIENCIA
COLECCIÓN DIRIGIDA POR JORGE WAGENSBERG

Para Elisabetta, Joel y Júlia

AGRADECIMIENTOS

Este libro incluye una pequeña parte de todo un campo de investigación que explora los orígenes de la complejidad y sus límites. Si bien en algunos casos las preguntas formuladas tienen una respuesta (nunca definitiva), en la mayoría de los ejemplos las preguntas abiertas seguirán abiertas después de cerrar el libro. Aunque podría pensarse que ésta es una carencia, creo que de hecho es lo más estimulante de lo que he intentado explicar: los límites de lo posible encuentran su lugar en los límites del conocimiento científico. En este sentido, las ideas que se despliegan a lo largo de los siete capítulos servirán al lector para situarse en estas fronteras aún inexploradas.

Son muchas las personas que han influido en el desarrollo de este libro, en especial mis colegas del Santa Fe Institute, un lugar imposible donde los haya. También a mis colaboradores de Complex Systems Lab, en particular a Raúl Montañez y Luis Seoane por sus comentarios sobre algunos de los capítulos. Algunas ideas también han surgido de las cenas y paseos por las Ramblas de Barcelona con mis viejos compañeros de instituto, Josep Cañellas y Jordi Ibarz. He disfrutado también, y mucho, de mis conversaciones con Ernesto Azzurro, un científico de primera y magnífico dibujante, que comparte conmigo la fascinación por los monstruos. Él me contó la sorprendente historia de la sirena del capitán Eades, que me sirvió para introducir el capítulo 3.

Algunas de las ideas relacionadas con el futuro de los humanos le deben bastante a la oportunidad que tuve de participar como asesor científico en la exposición del CCCB «+Humans» (sobre el futuro de nuestra especie) y a mis conversaciones con Rosa Ferré y Miquel Nogués así como con Juan Insúa, todos ellos fervientes apóstoles de la tercera cultura.

Este libro ha sido concebido y desarrollado a lo largo de los años y el parto final ha sido difícil. Una buena parte de las ideas y ejemplos utilizados vinieron a mi cabeza durante los trayectos en el autobús de la línea 45, y otras tomaron forma en el Instituto de Santa Fe y en el Centre for Living

Technology de Venecia. Pero nunca (ni siquiera ahora) pude llegar a un resultado final que sintiera como definitivo. Sin embargo, algún día tenía que acabarse, y debo agradecer a mis editores de Tusquets su infinita paciencia con mis peticiones de tiempo extra y a Josep Maria Ventosa, en particular, su cuidadosa lectura y revisión de cada capítulo.

Quiero también agradecer finalmente a Jordi Alberch la fotografía de su hermano Pere Alberch, de quien he tomado algo más que una imagen. El título de este libro es el que él creó para uno de sus artículos y que considero de lo más estimulante: «The logic of monsters». Alberch fue un visionario que comprendió las carencias de la aproximación reduccionista centrada en el gen como explicación de la diversidad de formas en biología. Hace treinta años, cuando publicaba sus artículos más influyentes, ésta era aún una visión marginal dentro de la biología. Hubo que esperar más de veinte años para que el cambio de paradigma empezara a tener efecto, aunque lamentablemente demasiado tarde para este científico único e inclasificable que nos dejó cuando todo estaba aún por hacer. Confío en que este libro sirva de modesto homenaje a su legado.

Introducción

Lo esperable, lo inesperado

En algún lugar entre el azar y el misterio se desliza la imaginación.

Luis Buñuel

Ocurre con las ciudades como con los sueños: todo lo imaginable puede ser soñado.

Italo Calvino, *Las ciudades invisibles*

Una vez descartado lo imposible, lo que queda, por improbable que parezca, debe ser la verdad.

Arthur Conan Doyle

Imaginar

¿Cuántas piernas tendría un extraterrestre? ¿Cuántos ojos? Si pudiéramos viajar a un planeta distinto del nuestro, ¿encontraríamos vida en él?, ¿sería ésta totalmente incomprensible, basada en una lógica imposible de descifrar?, ¿existirían organismos o, en su lugar, una sopa de moléculas indiferenciada? ¿Habría enfermedades contagiosas?, ¿sería posible la inmortalidad?, ¿descubriríamos formas de vida dotadas de conciencia? La lista de preguntas que podríamos plantearnos es casi inacabable. El arte, el cine y la literatura han expandido el horizonte de nuestro mundo real y lo han enriquecido con su creación de criaturas únicas con cabezas extra, cuerpo de humano y cola de pez, un solo ojo o múltiples brazos. Los monstruos, en definitiva, nos han acompañado a lo largo de nuestra historia evolutiva y constituyen una parte esencial del legado cultural de todas las civilizaciones. San Jorge matando al dragón, Ulises enfrentándose al cíclope o un extraterrestre con boca retráctil

encerrado con siete tripulantes humanos en una nave espacial de la que nadie puede escapar. Y no olvidemos a los monstruos de feria, que definen a su vez otra dimensión de lo imaginario: la mujer barbuda, el gigante, el hombre con piel de lagarto o las siamesas unidas entre sí se encuentran cerca de una delgada línea que separa el mundo real del universo literario: de algún modo existen como productos posibles de la imaginación, aunque a la vez nos desconcierte su aparente imposibilidad.

El universo de los monstruos se extiende mucho más allá del dominio de las formas. Nuestra especie parece particularmente capaz de imaginar lo inexistente, y de un modo extraño los humanos encontramos cierto placer en las alternativas y los futuros posibles. La capacidad de evocación de lo improbable es extraordinaria. Series como *Star Trek* y la mayoría de libros de ciencia ficción explotan este universo de posibilidades mostrándonos civilizaciones lejanas habitadas a menudo por seres inteligentes, casi siempre bípedos y con atributos más o menos humanoides. En otros casos, la inteligencia tiene la escala del planeta al completo, o tal vez los seres de otros mundos son formas de energía sutiles e indefinidas. Pero no deja de ser interesante que la gran mayoría de los mundos de ficción estén habitados por organismos dotados de dos piernas, brazos y ojos, así como una boca en la parte frontal del rostro por la que hablan empleando nuestro mismo sistema de comunicación (y no pocos hablan un inglés muy correcto). Del mismo modo, la gran mayoría de los «monstruos» ideados por la mente suelen ser combinaciones de partes: leones con alas, como el que se encontraba a la entrada del palacio del rey Asurbanipal y que vemos en la figura 0.1, diosas con múltiples serpientes sobre su cabeza o demonios con cuerpo humano y cabeza de carnero. Ninguno de estos monstruos ha sido visto jamás, o, por lo menos, dejaron de verse una vez que se completó la cartografía del planeta.

¿Por qué debería un científico sentirse atraído por estos mundos o ideas alternativas? Si reflexionamos un momento, veremos que esta atracción es natural. La ciencia ha logrado encontrar las reglas generales que dan sentido a lo que vemos a nuestro alrededor, y lo ha logrado desafiando a uno de los mayores enemigos imaginables: la intuición de aquello que parece evidente. Parece evidente que la Tierra es plana: ¿no la vemos así cuando andamos por la calle? Parece evidente que el Sol gira alrededor de nuestro planeta: ¿no

sale por el este y se pone por el oeste cada día, después de dar una vuelta a nuestro alrededor? Parece obvio también que dos objetos de distinto peso alcanzarán el suelo, al dejarlos ir desde la misma altura, en tiempos distintos. Nuestra intuición nos lo dice a gritos. Pero fue necesario que un genio como Galileo viera más allá de lo que nadie había visto y concluyera que, muy al contrario de lo que sugieren los sentidos, una bola de madera y otra de hierro llegan al suelo simultáneamente cuando caen en el vacío. El poder del método científico es indiscutible, y el progreso del conocimiento ha conducido a una búsqueda constante de leyes universales y principios unificadores. Alcanzar este objetivo también requiere delimitar las fronteras de lo posible. La ausencia de monstruos es la otra cara de la moneda de la misma búsqueda de lo general.

Lo alternativo

La complejidad del mundo vivo que estudiaremos en los siguientes capítulos supera a menudo lo que los escritores han sido capaces de imaginar. Existen animales que parecen plantas, calamares gigantes que se desplazan bajo la superficie de los océanos a miles de metros de profundidad y superorganismos formados por millones de individuos, cada uno con su cerebro conectado al de los demás a través de señales químicas. Cuando se pudo mirar por primera vez el mundo a través de un microscopio, todo un cosmos hasta entonces invisible entró a formar parte de nuestra realidad, y hoy somos plenamente conscientes de que ese microcosmos incluye las formas de vida realmente dominantes. Pero esta enorme diversidad de formas, tamaños y estilos de vida no está exenta de leyes. A medida que vamos creando una nueva cartografía, en la que acaban encajando todos y cada uno de los millones de especies conocidas, descubrimos regularidades en la extraordinaria diversidad de formas. Como ocurre con los lenguajes humanos, detrás de todas las diferencias que los hacen incomprensibles para aquellos que no los hablan, se ocultan formas generales de construir frases, dictadas por un conjunto de reglas generativas: la sintaxis.

¿Existe una sintaxis de las formas vivas? En el paradigma evolutivo tradicional, la creación de nuevas formas y diseños es el resultado de un mecanismo de variación aleatorio y constante (debido a los errores en la replicación que se producen cada vez que el genoma se copia) y de la selección de aquellas variantes más capaces de generar nuevos individuos. Este proceso ha sido demostrado una y otra vez en contextos muy diversos, algunos de los cuales afectan a nuestra propia supervivencia. Por ejemplo, el desarrollo de antibióticos creó una nueva fuente de selección para los patógenos que se querían combatir. Debido a la astronómica diversidad de genomas posibles, cualquier estrategia dirigida a una diana (no importa cuál) se encontrará con unos pocos individuos afortunados que son resistentes. Mientras los demás son eliminados por el agente selectivo (el antibiótico), los supervivientes darán lugar a una nueva generación que heredará su resistencia, y tal vez la mejore, dado que algunos de los descendientes tendrán otras mutaciones aún más ventajosas. De un modo similar, podemos imaginar que las formas de los organismos son el resultado de las presiones evolutivas asociadas a la optimización de su capacidad de obtener nutrientes, procesar información o resistir los cambios del medio ambiente. Las hojas de las plantas, por ejemplo, muestran una enorme diversidad de formas que parecen corresponderse muy bien con su papel de captación de la energía procedente del Sol, pero también con la gestión del agua y la respiración. Las distintas condiciones selectivas tienen un papel clave para favorecer diferentes tipos de adaptaciones. Así, en ecosistemas áridos, las hojas se han convertido en espinas con objeto de reducir la pérdida de agua.

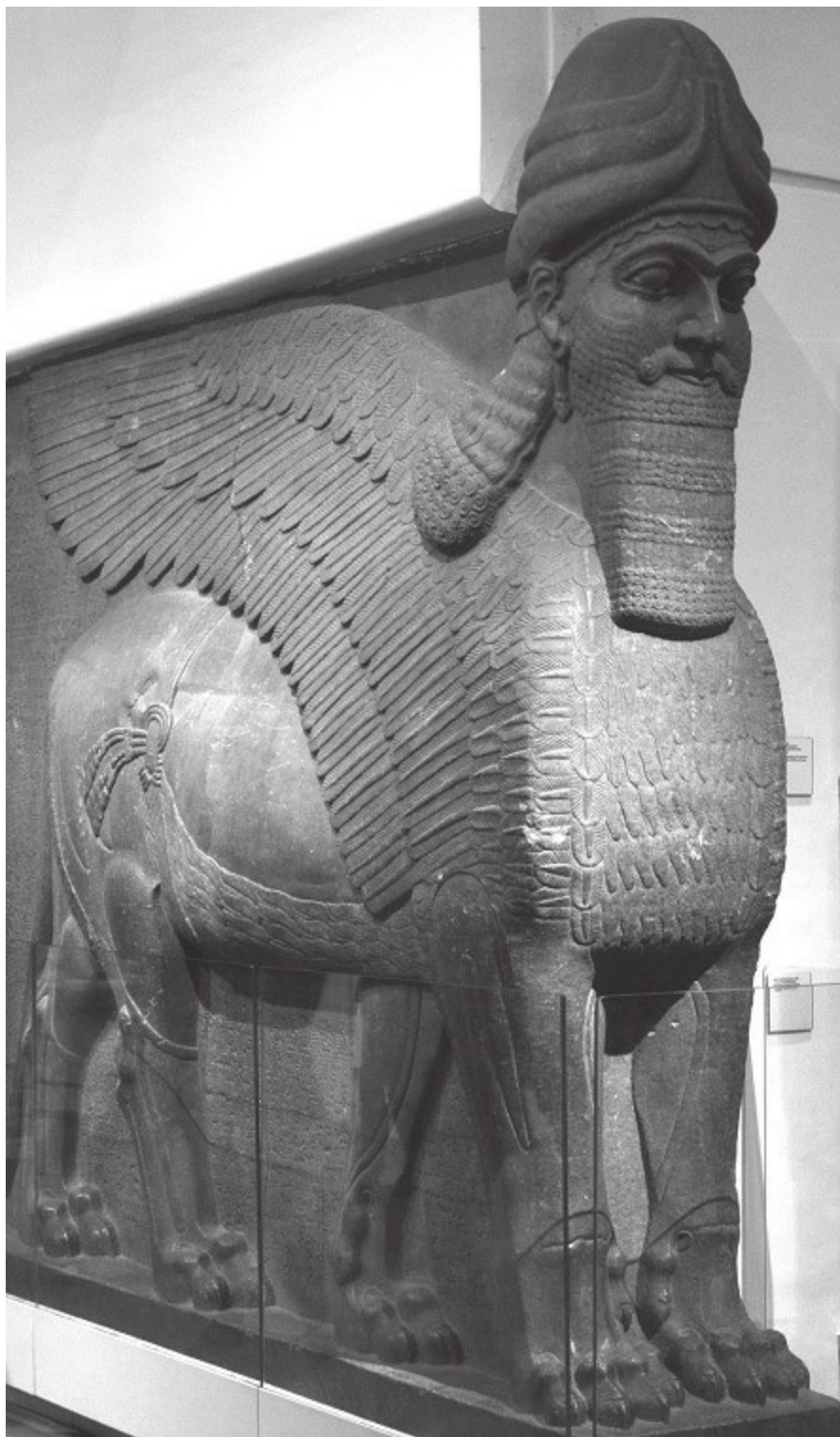


Figura 0.1. Uno de los leones alados que protegían la entrada del palacio de Asurbanipal, en la antigua ciudad de Nimrud (hoy en día cercana a Mossul, en Irak), y que se encuentra en la actualidad en el Museo Británico.

Muchos biólogos consideran que la selección darwiniana es probablemente el motor principal, si no único, del cambio evolutivo. Richard Dawkins ha sido uno de los defensores más brillantes y elocuentes de esta propuesta, y muy a menudo ha afirmado que la teoría de Darwin explica la evolución de la complejidad que ha dado forma a nuestra biosfera. Aunque no cabe duda de que la selección natural es un elemento clave, existen otros componentes que afectan a la dinámica del proceso evolutivo que tienen poco que ver con este paradigma. Uno de los primeros en señalar esta deficiencia fue el biólogo holandés Hugo de Vries, a quien debemos el concepto de gen (De Vries comprendió que debían existir «partículas» discretas dentro de las células que de algún modo determinaban ciertos caracteres externos) y también la idea de mutación. Tal y como señaló De Vries en 1904, «La selección natural puede explicar la supervivencia del más apto, pero no puede explicar *la llegada* del más apto». Si bien estas ideas se desarrollaron mucho antes de la llegada de la biología molecular, y estaban aún lejos de la comprensión de los mecanismos de la herencia, el problema planteado sigue ahí. La importancia de este problema cristalizó en 1995 con la publicación de *The Major Transitions in Evolution*, en la que John Maynard Smith y Eörs Szathmáry, ambos conocidos evolucionistas, presentaron una lista de innovaciones que se han dado a lo largo de la evolución, como la aparición del código genético, las primeras células, los organismos multicelulares, las sociedades o el lenguaje. Cada una de estas transiciones representa un cambio cualitativo de gran calado, y explicar sus orígenes es el reto más importante que nos plantea la historia de la vida. ¿Puede la selección natural dar cuenta de estos cambios?

Uno de los investigadores que se tomó muy en serio esta cuestión fue el catalán Pere Alberch (1954-1998), biólogo teórico y embriólogo que desarrolló durante su corta carrera una perspectiva de la evolución con la que contribuyó de forma decisiva a una visión estructuralista de la complejidad de la biología, en particular en lo tocante a los orígenes de la complejidad de las formas (figura 0.2). En esta visión se propone que, junto al papel de la selección natural, existen restricciones fundamentales que tendrían poco que ver con el paradigma darwiniano. La idea de fondo es que la selección natural no es la responsable última de las estructuras que surgen a lo largo de la

evolución: existen limitaciones estructurales y mecanismos de generación de complejidad que tan sólo pueden permitir un conjunto limitado de formas posibles. Lo posible sería en este caso sólo una parte de lo imaginable. Esta idea, desarrollada en la década de los ochenta por Alberch y, entre otros, por Stuart Kauffman, Brian Goodwin, George Oster o James Murray, no deja de ser muy controvertida, pues propone que el universo de posibilidades permitidas está limitado por la existencia de mecanismos de generación de estructuras tan inevitables que se imponen por encima de la selección.

Alberch empleó un ejemplo especialmente revelador para ilustrar esta idea: la existencia de un repertorio limitado, y perfectamente clasificable, de monstruosidades debidas a las anomalías en el desarrollo de fetos inviábiles. En la figura 0.3 vemos algunos ejemplos dibujados por el anatomista y cirujano Joseph Maclise, realizados hacia finales del siglo XIX. En estos grabados se muestran varias formas comunes de malformación (teratologías) que afectan a los embriones humanos y que dan como resultado individuos que presentan diversos grados de simetría especular, con una fusión mayor o menor de las dos copias de la cabeza. Éste es tan sólo un ejemplo de monstruosidad característico: pese a que esta anomalía no tiene ningún valor selectivo (estos individuos no se pueden reproducir), no observamos un repertorio arbitrario, o aleatorio, de deformidades. No hay una variedad infinita. Por el contrario, tal y como demostró Geoffroy Saint-Hilaire en la primera mitad del siglo XIX, podemos realizar de hecho un inventario muy bien organizado de las teratologías. Por paradójica que resulte esta idea, existe un orden dentro de la monstruosidad o, como lo definió Alberch en uno de sus artículos, hay una «lógica de los monstruos». Ciertas simetrías parecen dominar de forma total el repertorio de anomalías, mientras que otras (como la presencia de tres cabezas) nunca son observadas. Este ejemplo es especialmente importante, dado que nos sugiere que las formas naturales que resultan del desarrollo de los embriones están sometidas a reglas de organización que van más allá de lo que esperaríamos de una capacidad de explorar estructuras basada en mutaciones genéticas. El mensaje principal de la visión estructuralista es que no todo es posible. Al contrario, existen restricciones muy importantes a lo que puede ser generado por procesos de evolución. El biólogo teórico Stuart Kauffman ha formulado esta idea de

forma general en su libro *The Origins of Order*, en el que se sugiere la idea de que el orden de las estructuras biológicas (desde los genes a los ecosistemas) resulta de una exploración del universo de lo posible. La selección natural es imprescindible, pero opera sobre un espacio de estructuras bien delimitado.

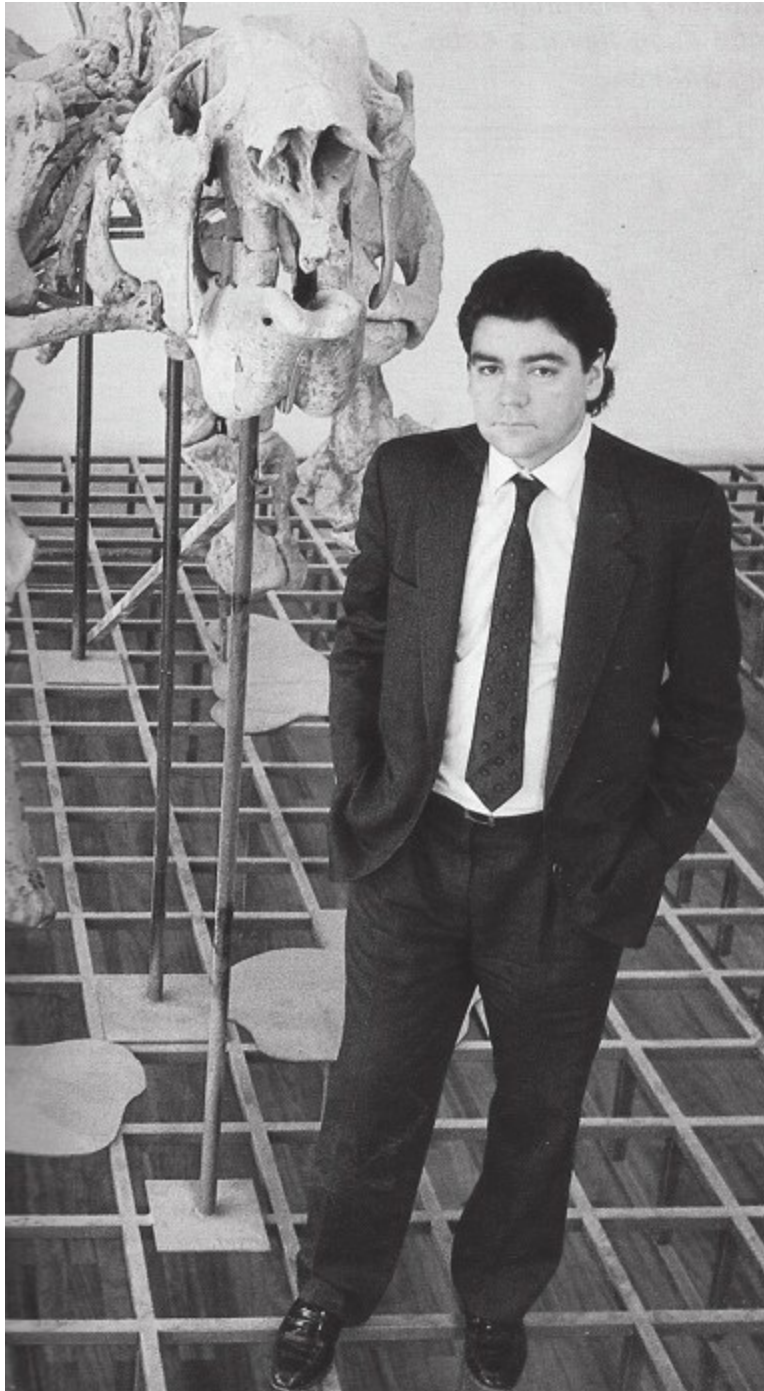


Figura 0.2. El biólogo Pere Alberch (1954-1998), durante su etapa como director del Museo de Ciencias Naturales de Madrid (fotografía cortesía de Jordi Alberch).

El papel que desempeña la historia en el problema que nos planteamos es también importante, tanto en el fondo como en la forma. Este problema puede plantearse como un experimento mental, tal y como lo formuló Stephen Jay Gould en su célebre y muy controvertido libro *La vida maravillosa*, en el que se pregunta qué hubiera sucedido si se pudiera repetir el proceso de evolución empezando de nuevo a partir de cierto momento del pasado remoto, como si rebobináramos la cinta y pudiéramos dejar que todo ocurriera de nuevo. Podríamos preguntarnos si la vida se habría desarrollado del mismo modo, empezando por nuestro planeta aún en formación hace más de 4000 millones de años. O si la explosión de creatividad que tuvo lugar hace 550 millones de años, la denominada explosión cámbrica, habría ocurrido de nuevo, y cómo. O si los humanos habríamos tan siquiera aparecido.

Sin duda, la historia tiene un papel relevante, dado que un accidente (como la extinción de los dinosaurios) puede cambiar drásticamente el futuro. Es un tema de enorme atractivo dentro de la literatura de todas las épocas. En la mayoría de los relatos, películas o cómics que lo exploran, los pequeños cambios en el pasado suelen dar lugar a grandes cambios en el futuro, pero no siempre es así. La película de la que toma su título original inglés el libro de Gould (*Wonderful Life*) es el clásico de Frank Capra *It's a Wonderful Life* (*Qué bello es vivir*), cuyo protagonista, George Bailey (interpretado por James Stewart), tiene la oportunidad de contemplar qué distinto habría sido el mundo que conoce si él mismo nunca hubiera nacido. Bailey descubre entonces que algunos episodios de su vida han tenido enormes consecuencias. Por ejemplo, al no haber nacido, no pudo evitar que su hermano Harry muriera ahogado en un lago helado cuando era pequeño. A su vez, Harry, destinado a ser un héroe militar, no pudo salvar durante la segunda guerra mundial a un batallón, que inevitablemente pereció. La vida de Bailey, por lo tanto, tiene grandes consecuencias.

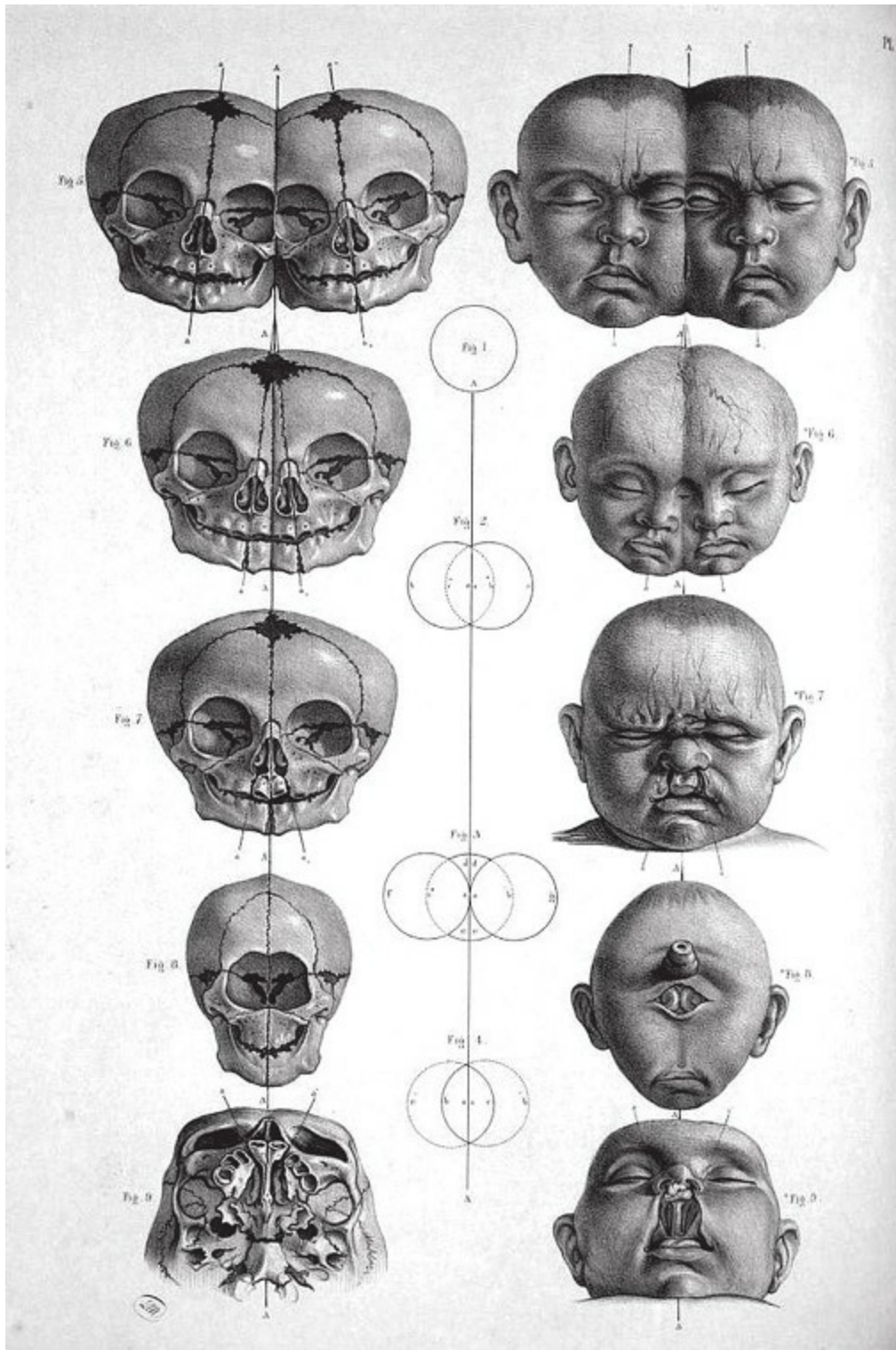


Figura 0.3. Ilustraciones del anatomista Joseph Maclise que muestran diferentes grados de duplicación de la cabeza en fetos humanos.

¿Tiene la vida de cualquier ser humano un impacto similar? La contrapartida la encontramos en un episodio de la serie británica de ciencia ficción *Dr. Who*, en el que los viajeros del tiempo se encuentran con el pintor Vincent Van Gogh en la época en la que ya había pintado algunas de sus grandes obras, antes de caer en la depresión que lo llevó al suicidio. Los protagonistas se ganan la confianza del artista y lo llevan al futuro, para que pueda ver un museo en el que su obra es admirada por todos. Al devolverlo de nuevo a su época, Van Gogh parece feliz, y lo vemos en un campo de trigo susurrando: «esto lo cambia todo...». Los viajeros regresan a su tiempo y corren al museo para admirar las pinturas maravillosas que Van Gogh no había podido crear debido a su muerte prematura. ¿Se encontrarán con cuadros tan sorprendentes como *La noche estrellada*?, ¿con nuevos estilos o temas nunca antes abordados? Al llegar, todo sigue igual. A pesar de sus esfuerzos, el futuro no ha podido ser modificado. Fuerzas mucho más importantes (tal vez una mente ya malograda) parecen haberse impuesto a los cambios positivos generados por los viajeros del tiempo. Podemos argumentar que el Van Gogh del relato imaginario necesitaba tal vez algo más que una visión del futuro. Su soledad o la incomprensión de su propio tiempo pudieron más que un reconocimiento que él no disfrutó en su mundo real. Lo cierto es que algo parecido nos ocurre cuando nos planteamos, desde la ciencia, teorías acerca del papel de la historia sobre la evolución: en algunas ocasiones, los accidentes tienen un papel crucial, pero en otras muchas no tienen ninguno.

La ciencia de lo posible

En este libro nos preguntaremos acerca de lo que la ciencia tiene que decir sobre lo posible y lo imposible. Examinaremos distintos atributos que los biólogos evolutivos consideran grandes innovaciones de la historia de la vida sobre nuestro planeta y valoraremos hasta qué punto son singulares o, por el contrario, esperables, y tal vez estén aguardando a ser hallados en alguno de los mares helados de otros cuerpos del sistema solar, como Titán o Europa. Nos aventuraremos en la zona desconocida y cambiante que separa el mundo de la ficción y el mundo de la ciencia. En el primero, la libertad de

explorar lo posible sin barreras debería permitirnos el acceso a todas las formas, ideas o universos que la imaginación pueda crear. En el segundo, buscamos las leyes generales que dan forma a la misma frontera: la conservación de la energía, la segunda ley de la termodinámica o la teoría de la información sirven de bastidor a nuestra aproximación a la realidad y limitan el repertorio de posibilidades. Con todo, la frontera que queremos delimitar se hace borrosa cuando nos preguntamos acerca de la singularidad de algunas de las creaciones de la evolución, como el cerebro o la conciencia.

¿Cuál es nuestro punto de partida? Por un lado, nos apoyaremos en algunos de los resultados más sólidos de la física y la matemática. Por otro, estableceremos una hipótesis de trabajo importante: asumir que la evolución por selección natural es un proceso que actúa de forma general no sólo sobre la materia viva sino también sobre algunos procesos fundamentales que escapan a la herencia genética, con lo que nos internaremos a través de la cosmología, el lenguaje o la cultura. Además, emplearemos dos puntos de apoyo particulares que nos ayudarán a definir algunas de las conclusiones que queremos alcanzar, y que parecen a primera vista inaccesibles. Uno es el empleo de modelos de evolución artificial o de simulación que nos proporcionan alternativas al mundo real que observamos a nuestro alrededor. Estos modelos se basan en el empleo de selección darwiniana: el ordenador genera variabilidad (mediante algo parecido a las mutaciones), sobre la cual actúa un proceso de selección orientado a buscar las mejores soluciones a un problema dado. Estos sistemas de evolución artificial nos han permitido no sólo comprender mejor procesos naturales y diseñar circuitos o motores, sino también encontrar situaciones inesperadas que nos demuestran que existen espacios posibles a los que nuestra mente no tiene acceso.

El otro componente de nuestro estudio tiene que ver con los visionarios que formularon teorías revolucionarias. Matemáticos que intentaron comprender por qué la vida requiere la reproducción, físicos que intentaron desentrañar la naturaleza del código genético cuando era totalmente desconocida o pioneros de la informática que jugaron a crear mundos «vivos» en el interior de los primeros ordenadores, mucho antes de que conceptos como simbiosis o coevolución hubieran sido reconocidos como centrales para nuestra comprensión de la biosfera. Estas ideas y experimentos visionarios,

desconectados de lo que el estudio de la realidad terminaría revelando, ofrecen un punto de vista único acerca de lo posible. El objetivo principal es apoyar la idea de un universo (vivo y no vivo) que es probablemente predecible. Un universo que habita un espacio tridimensional con una dimensión temporal añadida. ¿Por qué? Un universo en el que ha surgido un nuevo estado de la materia capaz de crecer, evolucionar y copiarse a sí misma. ¿Será esta forma de materia distinta si la hallamos en otro mundo distinto del nuestro? Y no olvidemos que esta materia ha sido capaz de entender su propio mundo, en el que se ha desarrollado la conciencia, que, según el físico Max Tegmark, es a su vez otro estado de la materia. ¿Es esta innovación un accidente extraordinario o, como algunos han apuntado, un resultado colateral de la evolución de un gran cerebro?

Uno de los aspectos de esta materia consciente que resultan más interesantes es el de que la mente humana tiene una especial predilección por imaginar lo que no existe, e inventarlo. Con lo que llegaremos así a una última pregunta: ¿es nuestra imaginación capaz de imaginarlo todo? Alguien podría decir que hablar sobre lo imposible es un ejercicio algo arriesgado. Pero no debemos olvidar que los seres humanos somos los mayores fabricantes de imposibles. No sólo con la imaginación o gracias al conocimiento de las leyes de la naturaleza que hemos descubierto. También porque somos capaces de dar forma a la materia y crear objetos y sistemas nuevos. Cuando en 1960 Theodore Maiman iluminó un cristal de rubí con un haz de luz, surgió de un extremo del cristal un rayo de luz roja muy bien definido y que resultó poseer propiedades extraordinarias. Lo que se daría en llamar «rayo láser», y que iba a cambiar la historia de la tecnología, resultó ser un tipo de luz única y que sólo puede existir en aquellos lugares del universo en los que una inteligencia ha florecido (véase la figura 0.4). Hasta ese momento, el láser era «imposible». Del mismo modo, somos capaces de crear en el laboratorio estructuras millones de veces más pequeñas que cualquier cosa que podamos ver a simple vista, y que con toda seguridad no aparecen espontáneamente en ningún otro lugar del universo, a menos que «alguien» las construya.

La tecnología ha cambiado nuestras vidas y también nuestro mundo. Nuestra huella sobre el planeta es tan enorme que no pocos científicos la han comparado con la que genera una fuerza geológica. Si ahora desapareciéramos de repente, un visitante futuro que estudiara a fondo la Tierra descubriría una buena cantidad de anomalías cuyo origen no podría explicar. Grandes masas de piedra y cemento aparecerían en gigantescas aglomeraciones. El curso del agua de la mayoría de los ríos se hallaría modificado drásticamente y en una gran parte de la superficie del planeta aparecerían evidencias de inmensos monocultivos de unas pocas especies cuya abundancia desafía toda regla ecológica. Un buen número de minerales raros estarían extrañamente esparcidos por zonas muy alejadas de los yacimientos de los que surgieron. Y aun así, la mayor singularidad de nuestra especie, invisible para este visitante, se habría desvanecido debido a su propia naturaleza. La complejidad de la mente simbólica y el alcance de la creación que surge de ella definen realmente los contornos siempre en expansión de aquello que nos hizo singulares: nuestra capacidad de imaginar y hablar de aquello que no está presente. De situarnos en el tiempo, viajando virtualmente en él a través de la memoria, pero también de la imaginación. Nuestra tarea aquí será la de acercarnos a estos contornos cambiantes y delimitar, si las hay, sus fronteras. Para ello viajaremos en compañía de Darwin y Newton, de Euclides y Ramanujan, pero también de Isaac Asimov y Stanislaw Lem, de Picasso y de Goya. Todos ellos tienen algo en común, tan profundo como inexplicable. En palabras del antropólogo y escritor estadounidense Loren Eiseley: «Como de un universo misterioso, desde el abismo oscuro, el artista y el científico nos traen lo único, lo extraño, lo inesperado». Por difícil que ello resulte, intentaremos echar una ojeada a ese abismo del que surge la creatividad del mundo.

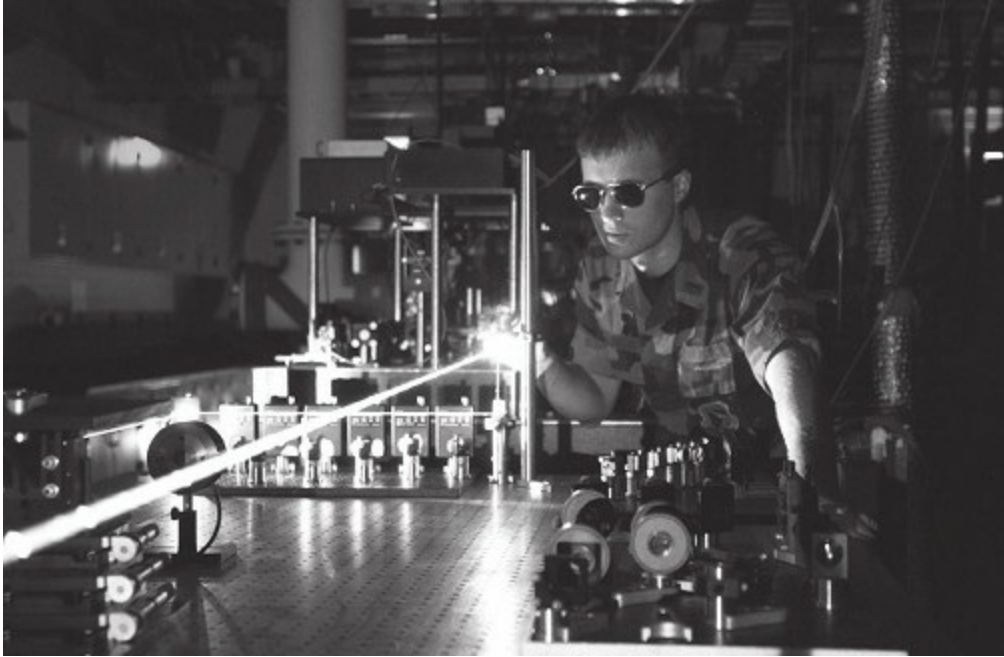


Figura 0.4. La tecnología nos permite generar estados de la materia o formas de radiación, como el láser, cuya existencia es imposible en cualquier parte del universo a partir de interacciones naturales.

1

Turing encuentra a Darwin

Si alguna vez nos encontramos con criaturas de un planeta similar a la Tierra, tal vez no podremos predecir a priori si tendrán alas, tentáculos, piel verde, cabezas o colas bifurcadas. Pero podemos predecir que, cualquiera que sea su aspecto, es muy probable que se basen en proteínas en agua, bajo la supervisión de ácidos nucleicos.

Isaac Asimov

El azar no excluye lo inevitable.

Christian de Duve

La máquina universal

Es un día cualquiera de 1945 en Bletchley Park, un pueblo de Inglaterra a una hora de tren de Londres. De una mansión de ladrillo rojo vemos salir por la puerta a un hombre joven que se detiene a saludar a algunos compañeros que hablan en la entrada del edificio. Después, baja las escaleras y se aleja, dejando atrás el lugar en el que había compartido uno de los desafíos intelectuales más difíciles de la segunda guerra mundial: romper los códigos secretos mediante los que los nazis ocultaban sus operaciones en el campo de batalla y que habían logrado crear gracias a la máquina que la inteligencia alemana había bautizado como *Enigma* (figura 1.1). Como ocurre con muchos otros ejemplos de códigos cifrados, *Enigma* fue diseñada para esconder la naturaleza de los mensajes que debían ser enviados de forma segura, pero en este caso sus diseñadores habían conseguido un nivel de complejidad extraordinario, dado que mediante un mecanismo muy sofisticado lograban que el número de posibles formas de codificar los

mensajes (y por tanto la clave secreta para descifrarlos) fuera casi astronómico. Era imposible probar todas las combinaciones, así que el frente de ataque debía ser distinto. El hombre que se aleja de la mansión lo consiguió empleando para ello otra máquina, construida en Bletchley Park. Nuestro protagonista diseñó, junto con un grupo excepcional de colaboradores, un sistema de análisis sistemático de los mensajes que obtenía el servicio de espionaje. Su aproximación tuvo éxito y muchos historiadores consideran que el triunfo de los expertos de Bletchley Park acortó la duración del conflicto entre dos y cuatro años. Este matemático genial es Alan Turing, quien en 1935 había publicado con tan sólo veintitrés años de edad un artículo fundamental que establecía las bases de la teoría de la computación. Es un trabajo enormemente abstracto, pero desde su adolescencia Turing sentía inclinación por las capacidades de los sistemas mecánicos para llevar a cabo cálculos y operaciones lógicas, y durante su estancia en aquel centro de espionaje contribuyó al desarrollo de los primeros dispositivos electrónicos capaces de ser programados.

Terminada la guerra, Winston Churchill ordenó que las máquinas y toda la documentación existente relacionada con este episodio fueran destruidas. Sobre lo que había tenido lugar en aquel edificio cayó el secreto, un secreto que nadie podía revelar sin ser acusado de alta traición. Así fue hasta 1974, cuando se hizo público el papel desempeñado por el contraespionaje británico. Desgraciadamente, los homenajes y reconocimientos llegaban tarde para Turing, que pocos años después de su trabajo en Bletchley fue juzgado por «conducta indecente» (era homosexual, un crimen en la Inglaterra de entonces), lo que le llevó al final a suicidarse en 1954, tan sólo unos días antes de cumplir cuarenta y dos años. Muchos científicos e historiadores de la ciencia coinciden en que la pérdida de Turing tuvo seguramente un enorme impacto en el desarrollo de la ciencia del siglo xx. Particularmente porque Turing había llevado a cabo pasos decididos y muy innovadores hacia el desarrollo de una teoría matemática de la biología y en especial del papel de la computación y la información en sistemas vivos. No hay que olvidar que en los últimos años de su vida, Turing formuló la primera teoría acerca de

cómo se organizan los embriones, la posibilidad de crear un ordenador inspirado en el cerebro y también planteó un test capaz de determinar si una máquina puede ser considerada inteligente.



Figura 1.1. La máquina de cifrado *Enigma* empleada por los nazis durante la segunda guerra mundial y que Alan Turing contribuyó decisivamente a descifrar, lo que fue clave para la victoria aliada (imagen de 1943, de los archivos federales alemanes).

El trabajo que lo hizo famoso antes de su implicación en el descifrado de *Enigma* se publicó en 1936 y se titulaba «Los números computables, con una aplicación al *Entscheidungsproblem*». El artículo estableció los fundamentos matemáticos de la computación, introduciendo para ello un concepto abstracto pero enormemente poderoso: una máquina capaz de llevar a cabo cualquier computación y que hoy conocemos como «máquina de Turing». La máquina (véase la figura 1.2, arriba) incluye en su definición dos componentes esenciales: (a) una cinta muy larga en la que se pueden leer símbolos escritos, así como espacios en blanco y (b) un dispositivo lector que puede identificar estos símbolos, modificarlos y cambiar su estado interno en función de lo que ha leído. Esta descripción parece muy alejada de lo que denominaríamos «ordenador» tal y como lo conocemos en la actualidad. El ordenador con el que escribo estas líneas es una máquina compleja, sin cintas ni cabezales lectores. Aun así, puede demostrarse que la máquina de Turing es una buena representación de las operaciones que puede llevar a cabo cualquier ordenador y puede de hecho simular las operaciones de cualquier ordenador imaginable. Dicho de otra forma: detrás de toda máquina que computa tenemos una máquina de Turing que la describe a la perfección. Aunque nunca diseñaríamos un ordenador siguiendo el esquema original, el modelo nos sirve para pensar acerca de la computación, sus límites y hacerlo de manera completamente general, llevando así a cabo una abstracción completa que nos permite aplicar la idea fuera del mundo de las máquinas. Esta idea de una máquina universal capaz de mecanizar cualquier tipo de computación tiene un curioso antecedente en la obra del mallorquín Ramon Llull (1232-1315), quien, en plena Edad Media, exploró un problema no menos ambicioso: crear una máquina lógica capaz de probar la verdad o falsedad de cualquier postulado. Empleando conjuntos de símbolos y palabras, Llull confiaba en poder introducir preguntas en su máquina, compuesta por una serie de discos (véase la figura 1.2, abajo) que podían girar y dar lugar a múltiples combinaciones, que a su vez servirían de base para encontrar respuestas lógicas. Este sueño de un cálculo automatizado define en cierto modo las raíces del intento de mecanizar el pensamiento. De lo que sí podemos estar seguros, gracias a las contribuciones de Turing y del también matemático Kurt Gödel, es de que lo que Llull pretendía —más allá

de cómo hacerlo mecánicamente— es imposible.

El trabajo de Turing es contemporáneo de la época de los primeros ordenadores programables y un poco anterior al surgimiento de uno de los campos más importantes de la biología: la genética molecular, que condujo al descifrado del código genético a mediados del siglo xx. El desarrollo de los primeros ordenadores y de la tecnología que cambiaría totalmente nuestra sociedad y la forma de comunicarnos fue paralelo, con muchas intersecciones, al de la biología molecular, que transformaría a su vez nuestra visión de lo vivo y de nuestro papel en la biosfera. Nos hemos detenido a hablar de Turing precisamente porque la idea de su máquina plantea un esquema completamente universal para definir el concepto mismo de computación. Un ordenador, el cerebro, una célula y quién sabe qué otras estructuras vivas procesan información. Si tuviéramos que decir de qué manera lo hacen, observando cada ejemplo por separado, no podríamos encontrar una ley general. La idea de Turing nos lo permite, y su máquina universal nos servirá para preguntarnos sobre la naturaleza del código de la vida y sobre algunas cuestiones muy relevantes: ¿es este código único o se trata de un accidente congelado?, ¿es un código óptimo en algún sentido?, ¿cabe esperar que la vida en otra parte del cosmos emplee un código similar?, ¿podemos crear nuevos códigos biológicos?

El triunfo de la información

La vida en nuestro planeta, y tal vez en otros, es posible porque nuestro universo (al menos lo que podemos ver de él) está dominado por unas leyes físicas que rigen el comportamiento de unos pocos elementos que hacen arder el interior de las estrellas, y que se transforman a lo largo de miles de millones de años en otros elementos más pesados, entre éstos todos aquellos que sirven de bloques básicos para construir los organismos vivos. El carbono, el oxígeno, el fósforo o el nitrógeno son el resultado de violentos procesos de creación y destrucción, que llevan en último término a la muerte de las estrellas. A medida que el combustible de una estrella se va consumiendo mediante reacciones nucleares, se acumulan átomos de mayor complejidad que son entonces utilizados a su vez como combustible de otras

reacciones. Pero tarde o temprano el equilibrio entre la gravedad (que tiende a colapsar la estrella sobre sí misma) y las reacciones nucleares (que la hacen expandirse) se rompe, y se produce una explosión que crea a su vez nuevos elementos de mayor complejidad. Como veremos más adelante, este ciclo de nacimiento y muerte de las estrellas es imprescindible para que surja la vida.

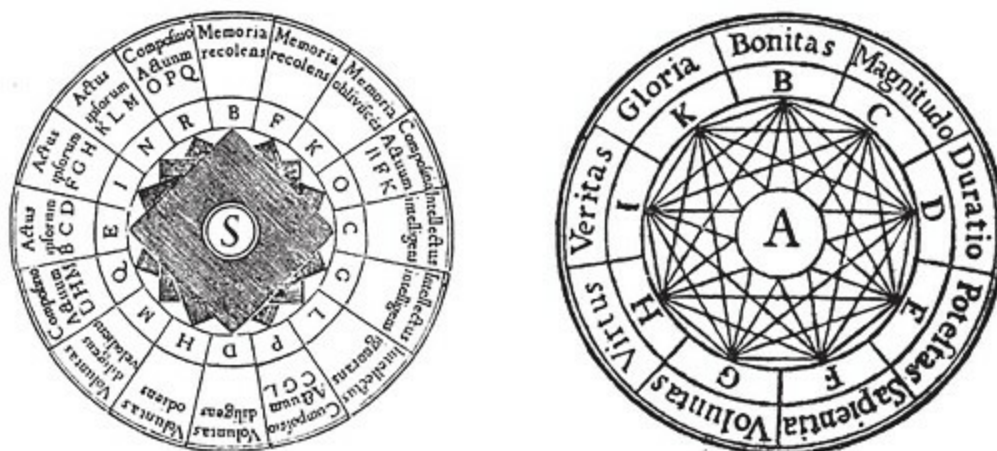
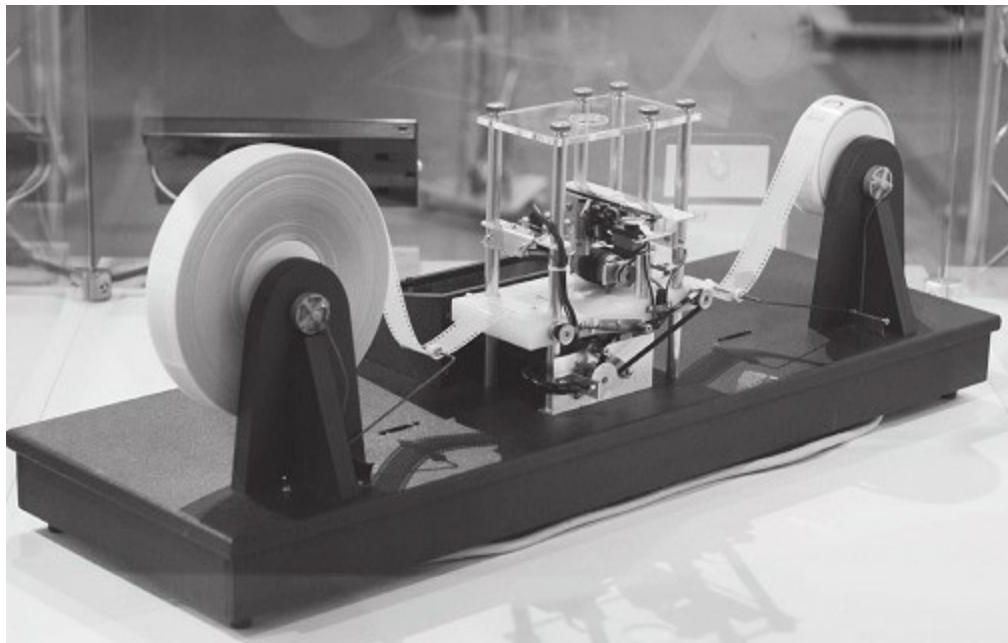


Figura 1.2. Máquinas que computan. La propuesta original de Turing (arriba, reconstruida por Mike Davey, https://simple.wikipedia.org/wiki/Turing_machine) es una máquina que lee y escribe sobre una cinta (idealmente infinita). A medida que lleva a cabo este proceso de lectura y escritura, su estado

interno también cambia. En la imagen de abajo vemos dos ejemplos de los diagramas que Ramon Llull empleaba para ilustrar su idea de determinar de forma lógica la falsedad o veracidad de un postulado.

Si analizamos la abundancia de elementos químicos de un cuerpo humano, comprobamos que posee una composición universal que todos compartimos, junto con una buena cantidad de agua. Pero parece evidente que un recipiente que contuviera las cantidades adecuadas de cada ingrediente tiene muy poco que ver con ninguno de nosotros. De algún modo, la vida no es una simple combinación de elementos químicos. Algunos científicos han señalado, acertadamente, que la vida es en realidad un estado de la materia. Y un estado enormemente especial. Por una parte, requiere una constante actividad: una célula necesita para sobrevivir disponer de recursos externos que pueda captar y emplear como material básico de construcción y reparación, de forma que su membrana, su núcleo o el armazón que le da forma se puedan mantener a lo largo del tiempo. Todo ello precisa (como en una máquina que lleva a cabo una tarea) aporte de energía y de materia. Ambas serán transformadas en otros tipos de energía y materia gracias al metabolismo, que actúa como sistema de generación de energía, así como de sistema transformador de moléculas de un tipo en moléculas de otro tipo, que pueden ser de gran tamaño. En todas las escalas posibles, el flujo de energía y materia permite crear estructuras complejas, en contra de lo que esperaríamos en sistemas físicos que tienden de manera espontánea a la homogeneidad y el desorden.

El estudio de cómo fluyen y se transforman la materia y la energía ha dominado buena parte de la física y la química, mucho antes de que estas disciplinas estuvieran siquiera definidas. Desde un principio, quedó claro que ciertos procesos tienen lugar de forma espontánea y que el estado final era siempre el mismo. Por ejemplo, si dejamos caer unas gotas de tinta dentro de un vaso de agua, sabemos que la tinta se expandirá con el paso del tiempo hasta quedar uniformemente distribuida por todo el volumen. Decimos entonces que hemos alcanzado un estado de equilibrio. En cambio, en una célula encontraremos muchos ejemplos de procesos que evitan alcanzar un estado semejante. El caso más claro nos lo da la presencia de gradientes: las membranas biológicas permiten que la concentración de ciertas moléculas o sales sea distinta de la que hay en el medio exterior. La capacidad de crear

diferencias permite definir un ambiente interno que separa al individuo del mundo en el que vive. Es por lo tanto parte esencial de su identidad. Además, una vez que se han creado diferencias, es posible emplearlas para llevar a cabo procesos activos de intercambio, que pueden ser un simple flujo de moléculas o la base para propagar un impulso nervioso. A un nivel mucho mayor, nuestro cuerpo se mantiene y renueva constantemente gracias a que ingerimos alimentos y agua de nuestro entorno que transformamos en moléculas que mantienen nuestros tejidos y órganos en funcionamiento. Esta renovación es tan profunda que la gran mayoría de los átomos que forman nuestro cuerpo en este momento ya no son los mismos que poseíamos hace apenas unos años. Literalmente podemos afirmar que vivir tiene mucho que ver con la vieja expresión de «renovarse o morir».

Para que todo funcione correctamente, parece razonable que exista una combinación de un sistema de separación entre lo propio y lo ajeno (el interior del organismo y el medio externo) junto con mecanismos activos de flujo de energía. En nuestro mundo, este par de propiedades corresponderían a una membrana cerrada y un sistema que mantenga reacciones, aunque simples, que podemos denominar «metabolismo». El primer componente es fácilmente obtenible: muchos lípidos forman esferas perfectas cuando se encuentran en un medio acuoso. Es muy posible que las formas de vida que puedan existir en otros planetas deban seguir esta restricción estructural y funcional, en buena medida impuesta por la física de los sistemas alejados del equilibrio. En este sentido, sospecho que nadie encontrará nada interesante — desde el punto de vista de la vida — en nubes de gas en el espacio que posean propiedades de organización. Aquí la ciencia ficción ha adelantado algunas posibilidades tan sugerentes como seguramente equivocadas. El astrofísico británico Fred Hoyle, por ejemplo, propuso en su novela *La nube negra* (1957) la idea de una nube de gas interestelar que se acerca a la Tierra y pone en peligro su supervivencia porque puede bloquear la luz del Sol. Pero cuando nos alcanza, la nube demuestra poseer una inteligencia muy superior a la de la humanidad, una especie de supermente de enormes capacidades. Si bien podemos imaginar una nube de gas como las que ya han sido estudiadas por los radioastrónomos, y admitir que pueden poseer una gran riqueza en su composición molecular, la existencia de una organización estable que pueda

identificarse con un organismo vivo, y aún más con un sistema capaz de comunicarse, parece difícil de sostener. Volveremos a este problema algo más adelante, pero baste señalar aquí que la posesión de una estructura bien delimitada, que nos defina como objetos vivos confinados en un espacio finito, es importante por muchos motivos. Muy especialmente porque estamos sujetos a la evolución y porque la materia viva puede persistir sólo a través de la evolución.

Cuando nos detenemos a estudiar los sistemas vivos, debemos reconocer dos elementos centrales (y relacionados entre sí) que escapan al discurso habitual de las teorías físicas basadas en la comprensión de la materia y la energía: su capacidad para reproducirse y el papel central que desempeña la información. El primer elemento es un atributo clave de la vida, y aunque la materia y la energía son condiciones necesarias, no son suficientes para comprender el origen del fenómeno de la replicación. Las amebas se reproducen dividiéndose; las plantas, a través de semillas o fragmentos de individuos, y nosotros a través de un proceso complejo que requiere, entre otras cosas, buscar una pareja, compartir el material genético, desarrollar durante nueve meses un nuevo individuo compuesto de miles de millones de células a partir de una sola célula inicial y unas cuantas cosas extraordinarias adicionales. La vida parece intrínsecamente ligada al hecho de que, tarde o temprano, los organismos vivos acaban dando lugar a más organismos.

El segundo aspecto es más sutil pero no menos importante: más que cualquier otra cosa, la vida maneja, almacena y procesa información. Esta información la adquieren las amebas, las hormigas o los cerebros complejos, y el resultado de esta adquisición siempre da lugar a algún tipo de respuesta o de lo que ahora llamaríamos una computación. Como señaló el físico John Hopfield, si algo distingue a un sistema biológico de un sistema físico es precisamente esta capacidad de computar. Una piedra es un objeto en equilibrio, incapaz de responder de manera activa a los cambios del ambiente, mientras que una bacteria posee receptores que le permiten detectar la temperatura o la humedad externas y responder a éstas en formas diversas. Un ambiente seco puede provocar una respuesta que detiene la actividad celular y hacer que las células se conviertan en esporas. El programa genético desempeña el papel del software que le permite a la célula actuar como un

pequeño pero potente ordenador. Un medio rico en recursos puede hacer que el microorganismo active sistemas metabólicos especiales o mecanismos de movimiento que le permitan acercarse a la fuente de recursos.

Esta capacidad de procesar información es el resultado de las interacciones entre una molécula de excepcional importancia, el ADN (el ácido desoxirribonucleico), y una multitud de nanomáquinas —las proteínas— que son codificadas por éste. El descubrimiento de la estructura e importancia del ADN es uno de los mayores logros de la biología del siglo xx. Pero mucho antes de que Francis Crick y James Watson, basándose en los resultados experimentales de Rosalind Franklin, propusieran la estructura en doble hélice del ADN, hubo intensos debates acerca de cuál podría ser el sustrato físico de la herencia. Se sabía que de algún modo los caracteres que definían las propiedades de un individuo debían estar determinados o verse influidos por alguna característica de las moléculas almacenadas en el interior de las células, pero los candidatos no estaban claros. Algunos pensaban que la «información genética» debía hallarse en las proteínas y otros sospechaban del material que se encontraba en el núcleo celular.

Aunque el concepto de «gen» estaba en el aire, dado que era evidente que se podían transmitir de generación en generación caracteres discretos y bien definidos, la naturaleza del gen estaba lejos de ser obvia. En el interior de este último se hallan los cromosomas, unas estructuras complejas que aparecen de forma regular en cada ciclo celular, formadas (como sabemos ahora) por cadenas de ADN enormemente compactadas. Estas estructuras compactas aparecen vistas al microscopio como hilos más o menos similares. Resultaba extraño entonces, como señalaba el genetista William Bateson, que «las partículas de cromatina, indistinguibles una de otra [...] puedan por su naturaleza conferir las propiedades de la vida». Y aquí reside de hecho el punto clave del problema: ¿cómo es posible que una enorme cantidad de atributos y caracteres distintos se almacenen en simples moléculas? Con el paso del tiempo, varios experimentos elegantes demostraron que los «genes» estaban constituidos por un tipo de estructura molecular denominado ácido nucleico, pero antes de llegar a esta constatación, un científico conocido por su labor en el nacimiento de una nueva física dio un argumento premonitorio de lo que cabía esperar.

Cristales desordenados

Erwin Schrödinger es uno de los gigantes intelectuales que construyeron el edificio original de la mecánica cuántica, una teoría que, junto con la relatividad, cambiaría para siempre la física y nuestra visión del universo. A Schrödinger le debemos una pieza esencial de esta teoría: la ecuación que lleva su nombre y que nos permite describir la naturaleza de los fenómenos cuánticos en términos de ondas. Merece la pena mencionar que, aunque esta ecuación lo llevó a los altares de la física (de los que no ha bajado), nunca le gustaron las extrañas implicaciones y paradojas de la disciplina que ayudó a crear, hasta el punto de llegar a decir que «no me gusta, y lamento haber tenido nada que ver con ella». Pero Schrödinger también dedicó esfuerzos notables a distintos aspectos de la filosofía de la ciencia y a tratar de llevar el método científico y la forma de abordar los problemas de la física al territorio de la biología. En 1944 publicó un breve libro titulado *¿Qué es la vida?** en el que resumía unas conferencias acerca de este tema, entonces nebuloso. El libro es interesante desde la perspectiva histórica, dado que nos ofrece una visión singular, basada en gran medida en la física, de la biología anterior a la revolución de los años cincuenta. La sugerencia más interesante y (a posteriori) sorprendentemente acertada, es la de que, cualquiera que sea su soporte molecular exacto, la información genética debe hallarse en lo que Schrödinger denominó «un cristal aperiódico». Sin conocer la que sería la imagen de marca de la revolución de la biología —la doble hélice—, este físico comprendió antes que nadie que un sistema capaz de reproducir de forma regular algún tipo de información debía poseer una organización que le permitiera preservarla de manera reproducible. Un cristal o un sistema similar podría proporcionar esta característica.

Los cristales convencionales, como los cubos de distintos tamaños que forman la sal de mesa, son a nivel microscópico redes regulares basadas en la repetición de una estructura básica. En el caso de la sal empleamos dos tipos de átomo, cloro y sodio, que combinados dan lugar de forma espontánea a una malla cúbica que se va repitiendo, como vemos en la figura 1.3. Esta estructura la podemos observar a simple vista, con lo que de hecho podemos decir que un efecto cuántico (la unión de sodio y cloro mediante unos enlaces

específicos) acaba dando lugar a una estructura macroscópica: el cristal, que para nosotros es pequeño pero para los átomos que lo forman es gigantesco. Los cristales son el paradigma del orden y podríamos pensar que, de alguna manera, tienen cierta capacidad de «autocopiarse», ya que una vez que se crea una semilla sobre la que el cristal pueda crecer, lo hará de forma predecible siguiendo el esquema regular que le permiten sus enlaces químicos. ¿Podríamos imaginar un planeta en el que una forma de vida existiera basándose en un mecanismo de este tipo? Una química tan simple da lugar a estructuras simples que carecen del potencial de adaptación de un sistema vivo tal y como lo conocemos. Cualquier sistema que crezca simplemente añadiendo más materia de forma estable y rígida no podrá producir ninguna innovación. Sin diversidad de estructuras, no es posible almacenar información y aún menos reaccionar de forma flexible a los cambios externos.

Un cristal sería demasiado simple y predecible, así que de algún modo en la base molecular de las células debería ser posible incluir la información compleja y diversa dentro de una estructura periódica. El hallazgo de Watson y Crick confirma de manera espectacular la predicción de Schrödinger: la molécula es una cadena totalmente regular que hace el papel del «cristal» y de hecho la evidencia de la doble hélice provino del estudio cristalográfico de preparados de ADN que permitían observar su periodicidad. Pero esta cadena doble puede crearse mediante combinaciones virtualmente infinitas de secuencias de cuatro nucleótidos: los bloques básicos que definen el alfabeto de la vida. Estas letras son A, G, C, T, que indican los nombres de los cuatro tipos de nucleótidos: adenina, guanina, citosina y timina. Las secuencias resultantes de combinar el alfabeto del ADN han permitido establecer las raíces de la evolución de los sistemas vivos, estudiar la variabilidad de nuestra especie y cómo hemos cambiado a lo largo de millones de años. Estos bloques básicos aparecen combinados en pares A-T y G-C a lo largo de las cadenas (véase la figura 1.4) y este apareamiento nos lleva de forma automática a la base molecular de la herencia: tenemos dos cadenas complementarias que se entrelazan dentro de la doble hélice. Si las separamos, tendremos dos cadenas «hijas» a partir de las cuales se puede replicar cada cadena complementaria de nuevo, con lo que habremos

generado dos copias de la cadena inicial. Pocas veces en la historia de la ciencia se ha producido una idea tan elegante y poderosa. Watson y Crick no discutieron esta idea clave en detalle en el artículo (de una sola página) que en 1962 los llevó a obtener el Premio Nobel de Medicina y Fisiología. Pero al final del texto, dejaron claro que conocían muy bien el alcance del hallazgo: «No se nos ha pasado por alto que el emparejamiento específico que hemos postulado sugiere inmediatamente un posible mecanismo de copia del ADN».

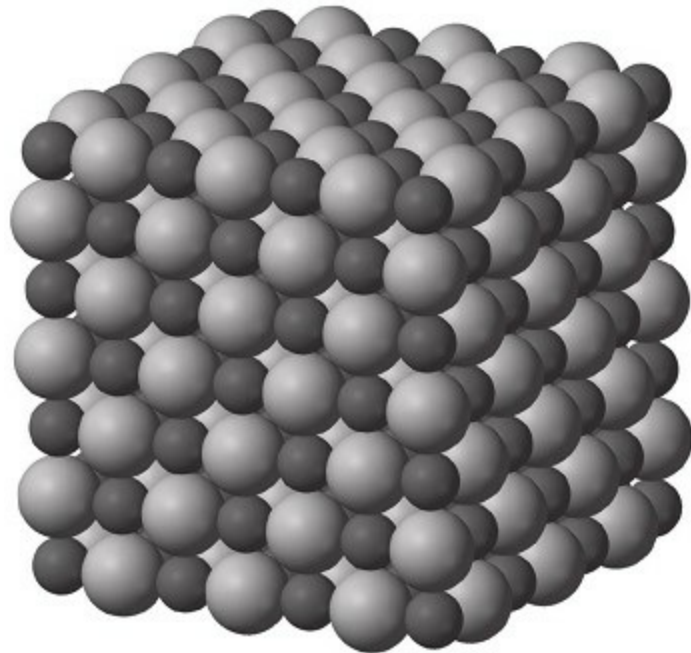


Figura 1.3. Orden natural. Los cristales de sal (arriba) son estructuras que se forman de manera espontánea cuando dejamos que una disolución de cloruro sódico (sal de cocina) se evapore hasta dejar sólo los átomos de sodio y cloro, que se ordenan formando una malla con simetría cúbica (abajo) en la que indicamos de forma ideal la posición de los dos tipos de átomos.

De un plumazo, el modelo de Watson y Crick explicaba la naturaleza de la información genética y de qué modo se heredaba. La elegancia de esta solución llevó al mismo Watson a señalar que una estructura así «por fuerza debía existir». Y lo cierto es que este esquema simple ha sido adoptado por todos y cada uno de los sistemas vivos que conocemos, desde las bacterias que habitan las chimeneas en ebullición de los fondos marinos o los líquenes que sobreviven en las montañas más altas del planeta, hasta los seres humanos, que comparten con todos ellos un origen común. También ha terminado formando parte de las majaderías que algunos políticos suelen decir, como «llevamos la honestidad en el ADN». Cómo pueda estar escrita la honestidad en la doble hélice es un verdadero misterio, aunque intuyo que quien emplea estas palabras no tiene ni idea de qué es el ADN y por ese mismo motivo hace una afirmación muy poco honesta. En cualquier caso, el ADN constituye la base molecular por la que la vida es capaz de propagar la información y explorar —mediante mutaciones— el espacio de posibilidades que le ofrece la combinatoria. Esta capacidad de combinación es tan elevada que escapa por completo a nuestra imaginación.

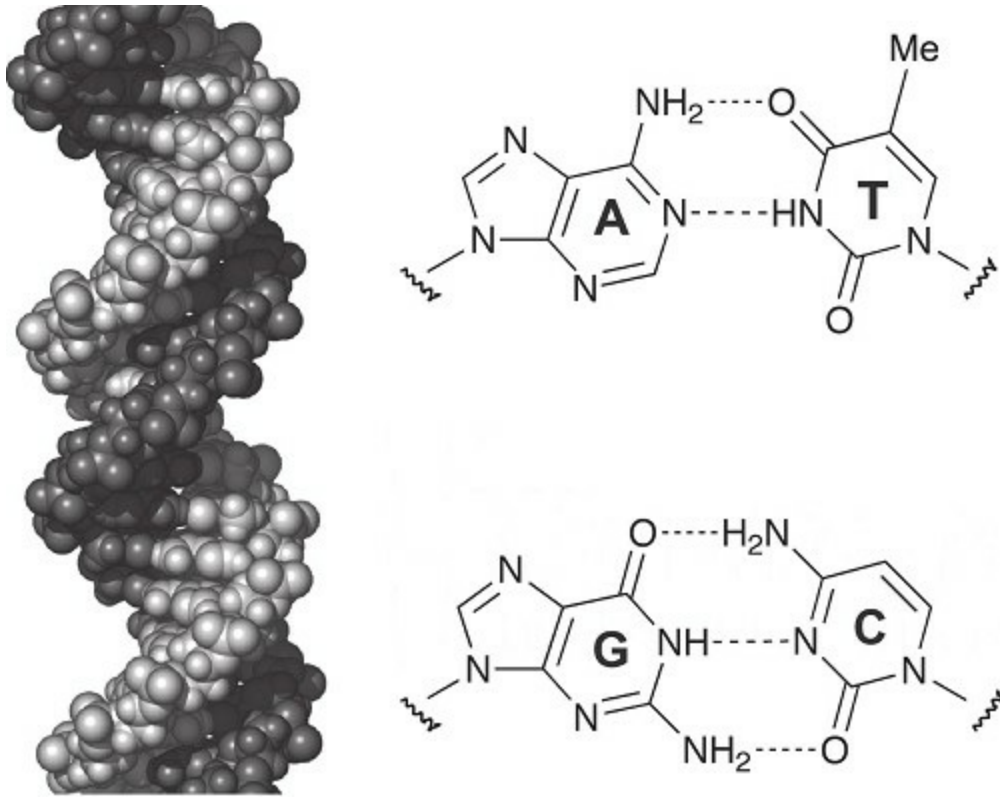


Figura 1.4. La base molecular de la herencia. El ADN (derecha) es la molécula empleada por nuestras células para empaquetar la información genética. Esta doble hélice está formada por dos cadenas complementarias construidas a partir de un alfabeto de cuatro «letras» (A, T, G, C) que forman pares A-T y G-C. Dado que podemos crear cualquier secuencia de letras, la cadena regular incluye en su interior un mensaje con, virtualmente, infinitas posibilidades.

Tal y como señala el biólogo Richard Dawkins, nuestra simple existencia (la de cada uno de nosotros) es el resultado de una lotería de naturaleza astronómica. Nuestro genoma, esta combinación particular de letras ordenadas en una secuencia única, es una singularidad entre un número de posibilidades muy superior al número de los átomos que existen en el universo. Otras secuencias, nos dice Dawkins, hubieran permitido tener a «científicos más grandes que Newton y poetas más grandes que Keats». Así es. La naturaleza del código y su potencial también definen un cosmos de posibles seres humanos del que tan sólo observamos una diminuta isla de individuos afortunados. Pero bajo la superficie de esta aparente aleatoriedad, de esta sobreabundancia de posibilidades, existe algo único: el código que ahora mismo emplean nuestras células es un código singular, uno entre millones.

El código perfecto

En prácticamente todos los aspectos de nuestra vida diaria participan elementos relacionados con una de las mayores revoluciones de la historia: la que produjo los ordenadores y los programas informáticos. Nuestros electrodomésticos, relojes, automóviles y ordenadores funcionan gracias a aquella revolución. Nuestra capacidad para acceder a redes de información y comunicarnos con grupos sociales extensos, para consultar bibliotecas o bases de datos virtuales de dimensiones insospechadas o guiar una sonda robótica de la que nos separan millones de kilómetros de distancia es en gran medida nuestro triunfo final sobre la información. A mediados del siglo XX la convergencia entre diversos resultados matemáticos de enorme importancia y la necesidad de mejorar la predicción de la trayectoria de proyectiles en el campo de batalla llevó al desarrollo de los primeros ordenadores, que permitieron superar nuestra limitada capacidad de hacer cálculos largos y complejos. Somos falibles y somos lentos. Y la necesidad de vencer al enemigo en tiempo de guerra favorece el empleo de recursos extraordinarios que hacen posible —a veces— alcanzar soluciones extraordinarias.

A medida que la nueva tecnología iba adquiriendo forma, la biología molecular empezaba también a desarrollarse. Muchos términos empleados en la segunda proceden de hecho de la primera, como las palabras «código», «traslación», «transcripción» o «codificación/decodificación». Y a medida que se desarrollaba nuestro conocimiento de los mecanismos moleculares de la vida, fueron surgiendo con claridad los procesos mediante los cuales la información contenida en el ADN se «lee» y da lugar a las funciones necesarias para mantener las células activas. El ADN actúa como el software celular, y cada gen puede entenderse como una secuencia que posee un comienzo (codificado mediante cierta secuencia) y un final (la secuencia de terminación). Estas cadenas son leídas y se generan otras cadenas de ácido ribonucleico o ARN. Este ARN es también una cadena, mucho más corta, que emplea un alfabeto distinto: A, G, C y U (uracilo) y en la que tan sólo cambia una letra. Esta molécula, menos estable que el ADN, puede dar lugar a su vez a una proteína pero puede también controlar la actividad (o «expresión») del propio ADN. En la figura 1.5 vemos una ilustración

esquemática del denominado proceso de «transcripción», por el que se lee la cadena de ADN y se sintetiza un ARN. Para llevar a cabo este proceso se necesita una molécula «lectora» que se conoce como ARN polimerasa. Esta molécula es capaz de detectar determinadas secuencias que marcan un punto de inicio en la cadena de ADN y, en ese caso, de unirse a la doble hélice, iniciando así el proceso de creación de un ARN cuya secuencia está determinada por la secuencia de ADN leída. A medida que la polimerasa va leyendo la secuencia, se desplaza a lo largo de la cadena y se van conectando entre sí las letras del ARN (empleando los materiales del medio celular) hasta que se llega a otra secuencia que indica que la lectura debe terminar. Aquí la polimerasa se desprende. El ARN se ha sintetizado siguiendo un proceso simple que tal vez ya nos sea familiar: la polimerasa no deja de ser una máquina lectora molecular que identifica caracteres en una cinta (el ADN) y lleva a cabo su lectura a la vez que traduce el código inicial (AGCT) a otra cinta de salida en un código ligeramente distinto (AGCU). Una vez terminado el proceso, la máquina se detiene y entra en un estado en el que puede repetir el proceso. De hecho, esta detención puede entenderse como el punto final del programa ejecutado. Ahora nos falta un paso adicional, ejecutado de nuevo por una máquina enorme y compleja denominada ribosoma.

El ribosoma es uno de los grandes protagonistas de nuestra historia y una de las piezas que ocupan el interior celular de forma muy visible. El ribosoma «lee» ahora las cadenas de ARN y crea un nuevo tipo de cadena, esta vez formada por letras pertenecientes a un nuevo alfabeto. Este alfabeto tiene 20 símbolos: los aminoácidos. El ribosoma es nuestra máquina de Turing molecular. Los 20 aminoácidos deben ser ahora codificados a partir del código de cuatro letras, y no se tardó mucho en comprender que esta codificación requería que el ribosoma leyera secuencias de tres letras del ARN (los llamados «codones», como AAA, AGC o GUG) y las interpretara adecuadamente como aminoácidos distintos. El esquema de lectura está resumido en el diagrama de la figura 1.6 (arriba), en el que tenemos (a la manera de Lull) de dentro afuera las tres letras de cada cadena de tres letras y en la parte externa el aminoácido concreto que codifica cada codón. En algunos casos, como ocurre con los codones UAA, UAG y UGA, no se

codifica un aminoácido. En lugar de ello, nos encontramos con una instrucción de parada (STOP) que detiene el proceso de creación de la proteína. Este esquema es compartido por la inmensa mayoría de especies vivas existentes, o como dijo el gran Jacques Monod: «Lo que vale para la bacteria vale para el elefante». Pero aquí nos preguntamos por algo aún más fundamental: de todas las posibles formas en que podríamos haber dibujado este esquema, ¿por qué precisamente ésta?

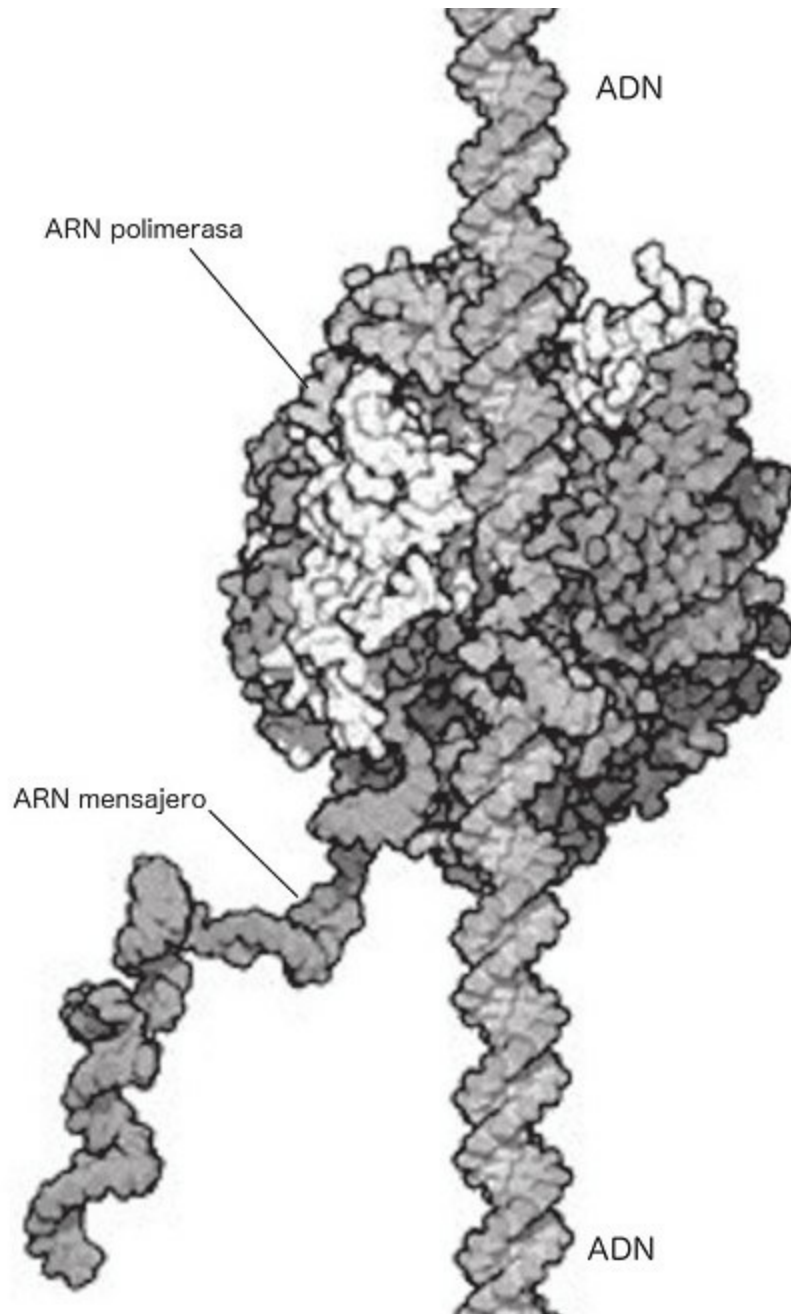


Figura 1.5. Transcripción del ADN. La molécula de ADN es «leída» por una molécula especial, la ARN polimerasa, que identifica un lugar de «comienzo» y un lugar de «fin» que delimitan la secuencia de un gen. Esta molécula es una nanomáquina que, a medida que va leyendo la secuencia de ADN, va sintetizando (transcribiendo) una nueva molécula de ARN, que será a su vez leída por los ribosomas para crear proteínas (dibujo de David Goodsell).

Un problema muy importante, que ya fue percibido por los pioneros del código genético, es el de reducir los errores que pueden surgir cuando, debido a una mutación, una letra de nuestro alfabeto es modificada. En la figura 1.6 vemos por ejemplo que el aminoácido leucina se obtiene para los codones CUU, CUC, CUG y CUA. La última letra puede por lo tanto modificarse sin que cambie el resultado. Pero si es la letra central la que cambia, por ejemplo, si en lugar de UGA tenemos UCA, entonces también se produce un error en el aminoácido resultante, que ahora es serina. Dado que las mutaciones son fuente constante de cambio en el código genético, así como en cualquier proceso de lectura y escritura, sus efectos pueden ser más o menos importantes dependiendo del impacto que tienen en el resultado final.

Y aquí reside la clave de la respuesta que buscamos. Aunque una mutación puede cambiar el aminoácido resultante, las propiedades químicas del aminoácido «equivocado» (por ejemplo su afinidad con el agua) pueden ser bastante similares a las del «correcto», de modo que el efecto sea poco importante. Empleando un potente programa informático y teniendo en cuenta lo que sabemos de la química de los distintos aminoácidos que emplean nuestras proteínas, los bioinformáticos Stephen Freeland y Laurence Hurst decidieron abordar el problema generando millones de posibles discos de combinación (algo que a Lull le hubiera sido muy útil) y midiendo para cada uno de ellos el grado de error cometido cuando alteramos los codones cambiando una letra al azar. En la figura 1.6 (abajo) vemos el resultado de esta investigación, que demuestra que, salvo un caso, el código genético tal y como lo conocemos es el mejor de todos. La gráfica nos muestra la frecuencia de códigos (eje vertical) que presentan cierto grado de error (eje horizontal). Vemos que la gran mayoría ocupan un dominio intermedio con errores altos y la flecha señala el lugar que ocupa el código de la vida tal y como la conocemos en nuestro planeta. La posición de esta solución nos dice que nuestro código ocupa un lugar privilegiado, inequívocamente distinguible y claramente optimizado por la evolución. Muy pronto, durante las primeras

fases de la emergencia de vida sobre la biosfera, las máquinas moleculares y su diseño de construcción fueron seleccionadas para leer cintas que no podemos ver a simple vista, pero que Alan Turing ya imaginó —sin saberlo— décadas antes del descifrado de la piedra Rosetta celular. Tal vez hubo otros códigos al principio que coexistieron con el ganador, pero los organismos que los portaban estarían con toda seguridad en una situación de inferioridad. Sin poder reducir eficientemente el impacto de las mutaciones inevitables, su descendencia se vería menos capaz de afrontar los cambios medioambientales y evolucionar. Hace unos 4000 millones de años, de entre una inmensidad de posibilidades, una fuerza de enorme poder —la selección natural— extrajo la solución ganadora. Y aquí sigue.

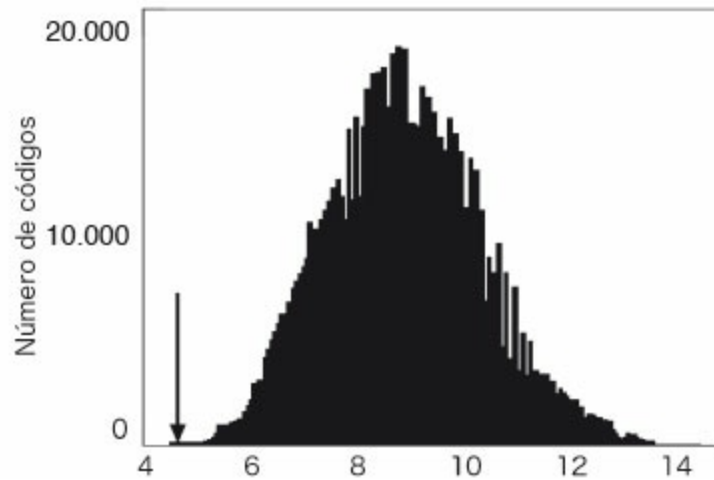
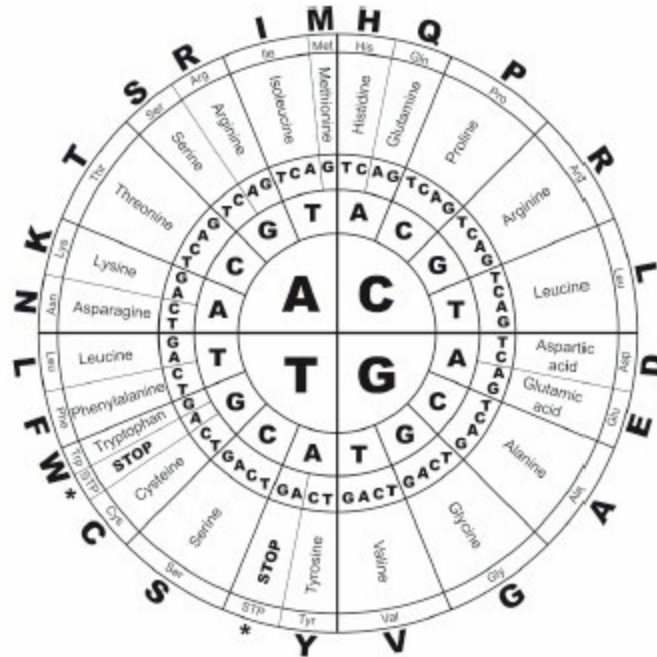


Figura 1.6. El código genético codifica, para cada trío de letras (un codón) del ARN (A, C, G, U), un aminoácido. Esto puede describirse mediante las combinaciones posibles de sus cuatro letras que permiten los tres discos de la figura superior. Cada codón codifica un aminoácido (indicado en el círculo externo) o bien una señal de inicio o de parada. El código podría ser cualquiera, pero es el mejor entre un millón. Un estudio de millones de posibles códigos (variantes del de la figura anterior) permite determinar el error cometido en cada uno de ellos. En la figura de abajo vemos que el error cometido por el código natural (flecha) demuestra que es un óptimo.

2

El mundo perdido molecular

Cualquier nueva reproducción de la cinta conduciría la evolución a lo largo de un camino radicalmente diferente del que realmente ha tomado.

Stephen J. Gould, *La vida maravillosa*

Cada ser vivo es también un *fósil*. Dentro de él, todo el camino hasta la estructura microscópica de sus *proteínas* conserva las huellas y los estigmas de su ascendencia.

Jacques Monod, *El azar y la necesidad*

Por muy frágil que pueda parecer la vida [...] hay que concluir que es también virtualmente indestructible.

D. Sasselov, *The Life of Super-Earths*

Moléculas posibles

Un viejo chiste cuenta la historia de un borracho que, en plena noche, busca algo a la luz de una farola. Un segundo borracho se acerca y le pregunta si ha perdido alguna cosa. «Las llaves de casa», le responde. Se ponen los dos a buscar, sin éxito. Al cabo de un buen rato, el segundo borracho le pregunta al primero: «¿Estás seguro de que están aquí?», y el primero le replica, señalando a otro lado de la calle: «No, se perdieron por allí, pero aquí hay luz y se ve mejor».

Esta historia se ha utilizado a menudo para ilustrar la idea de que a veces queremos llegar a entender un problema empleando una aproximación equivocada pero cómoda, basada en problemas que conocemos bien. También nos debe alertar acerca de sacar conclusiones generales a partir de

un conocimiento parcial del problema. Podríamos emplear el chiste para cuestionar lo que estamos intentando hacer aquí: preguntarnos acerca de leyes generales partiendo de un conocimiento parcial de la realidad, que parece iluminar sólo una pequeña parte de lo posible. El mensaje es especialmente claro si deseamos extraer conclusiones sobre el espacio que habitan las formas posibles de la vida. Para expandir la luz a lo largo de toda la calle, necesitamos algo más que la observación de la vida que conocemos. Debemos ser capaces de recrear aquello que no está a nuestro alcance. A falta de naves espaciales o evidencias directas, podemos recurrir de nuevo a los modelos teóricos y a nuestra capacidad de simular o crear alternativas.

En el capítulo anterior nos preguntábamos por la naturaleza de la información genética. Parece razonable suponer que los sistemas que podamos llamar vivos tendrán estructuras y serán o estarán basados en células que contengan información capaz de dirigir su división. En nuestro planeta, esta información está codificada en el ADN, que es un caso particular de lo que en química denominamos un polímero: una secuencia lineal de unidades básicas unidas una tras otra mediante enlaces químicos. Los llamados hidrocarburos lineales, por ejemplo, son polímeros de diversa longitud formados únicamente por átomos de carbono e hidrógeno. Estas moléculas, sin embargo, son muy estables y poco diversas, lo que las excluye como elementos relevantes de los sistemas vivos. Otro aspecto a tener en cuenta es que las moléculas biológicas, como el ADN y las proteínas, se encuentran sumergidas en un líquido muy especial: el agua. No todas las moléculas se comportan igual en un medio dominado por este líquido, y sabemos que en algunos planetas el agua puede ser rara o faltar casi por completo, mientras que otros líquidos dominan su geología. Es el caso, por ejemplo, de Titán, una de las lunas de Saturno, que en diciembre de 2004 recibió la visita de una nave espacial: la sonda *Huygens*, que había viajado durante años unida a la nave no tripulada *Cassini*. Las imágenes obtenidas por ambas sondas han permitido hacer por primera vez un mapa de un planeta con grandes lagos de metano líquido (figura 2.1). El metano es una pequeña molécula formada por un átomo de carbono y cuatro de hidrógeno, que suele representarse mediante una fórmula simple: CH_4 . ¿Podríamos imaginar una

biología alternativa basada en el metano?, ¿o es el agua una molécula especial, requerida para encontrar vida? Dejaremos esta pregunta para el final.

Empezaremos nuestro análisis preguntándonos en primer lugar si los ladrillos para construir los sistemas vivos aparecen o no con facilidad en el universo. Para responder a esta pregunta existen tres formas de abordar el problema. Una es la observación del universo, en particular el estudio de la composición de las moléculas que se sintetizan espontáneamente en el espacio interestelar o en los objetos que lo habitan, como otros planetas, asteroides o cometas. La segunda consiste en simular los escenarios posibles que creemos que pueden haber sido responsables de la síntesis de las moléculas básicas de la vida. La tercera, aún en su infancia, se apoyaría en un marco teórico que nos permitiera predecir, a partir de las leyes físicas y químicas que conocemos, el repertorio de moléculas posibles sin necesidad de crearlas en el laboratorio.

Moléculas inevitables

La vida surgió en nuestro planeta con enorme rapidez: menos de 200 millones después de la formación de la Tierra, ya había aparecido allí. El lector pensará que esta afirmación es discutible: ¿un periodo tan prolongado de tiempo puede considerarse «breve»? Lo es si tenemos en cuenta dos factores. El primero es que la Tierra primitiva (hace unos 4500 millones de años) experimentó un prolongado tiempo de violentos bombardeos de meteoritos, lo que mantuvo muy caliente su superficie y probablemente la convirtió en un escenario hostil para la vida. Es difícil imaginar que en estas condiciones fuera posible la persistencia de moléculas complejas capaces de propagar su información o evolucionar. Pero tan pronto como el planeta empezó a enfriarse y se redujo lo suficiente la intensidad de la lluvia de meteoritos, aparecieron los primeros microorganismos. Podríamos decir que «200 millones de años no son nada», puesto que la espera hasta la llegada de las primeras células no llega al 0,05 por ciento de la edad total. Merece la pena detenerse un momento para comprender la importancia de este hecho: una aparición tan rápida sugiere que, tal vez, la vida no sea difícil de

producir. En esta Tierra primitiva en la que surgen las primeras células, la química fue capaz de generar las piezas necesarias para dar paso a moléculas capaces de replicarse. Desconocemos los detalles de este proceso, pero tenemos dos fuentes muy valiosas de información que nos sirven para decir algo sobre lo inevitable de la química de lo viviente.

En 1953, el mismo año en que Watson y Crick publicaron en *Nature* su artículo sobre el ADN, apareció en la misma revista un trabajo que también iba a hacer historia. Su título, «Producción de aminoácidos en condiciones de una posible Tierra primitiva», indicaba con claridad el resultado fundamental de lo que hoy conocemos como «experimento de Miller». Su autor, Stanley Miller, preparó un sistema cerrado que permitía hacer reaccionar químicamente una mezcla de moléculas muy simples (agua, metano, amoníaco e hidrógeno) dentro de un circuito cerrado en el que la mezcla era calentada, enfriada y sometida a descargas eléctricas (véase la figura 2.2). Este experimento demostró sin lugar a dudas lo que hasta entonces sólo eran conjeturas: la existencia de una conexión entre la química tradicional y la química de lo vivo. Al cabo de una semana de funcionamiento se habían formado, entre otras cosas, una buena cantidad de aminoácidos distintos, muchos de los cuales se hallan en los sistemas vivos. Muchos años después, el químico mexicano Antonio Lazcano y otros colaboradores de Miller demostraron que otras condiciones distintas daban también resultados similares, indicando con claridad que los resultados extraordinarios del experimento no eran debidos a condiciones peculiares. Asimismo, retomaron las muestras de los experimentos originales y volvieron a analizar los componentes mediante técnicas más modernas, encontrando aún muchos más componentes precursores de las moléculas necesarias para la vida.

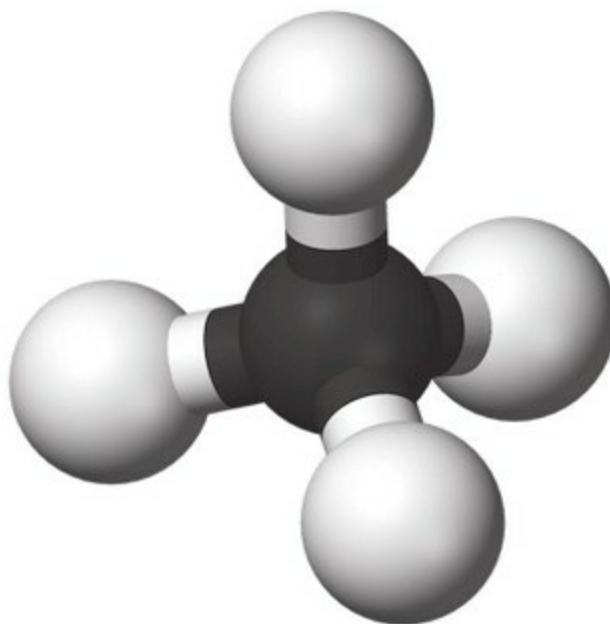


Figura 2.1. Arriba: representación artística de la superficie de un lago de metano de Titán, la mayor luna de Saturno (imagen de Steven Hobbs, NASA). La estructura del metano (CH₄) se muestra en la imagen inferior, con el único átomo de carbono (esfera oscura) en el centro y los cuatro átomos de hidrógeno conectados cada uno con un enlace. Éste es un mundo realmente frío: el metano (a la presión de nivel del mar en la Tierra) tiene un punto de fusión de $-183\text{ }^{\circ}\text{C}$ y permanece en estado líquido hasta los $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$ (su punto de ebullición).

El experimento de Miller ha sido presentado a menudo como una evidencia de la inevitable aparición de vida, pero en realidad se trata de una pieza importante —aunque incompleta— del relato de la emergencia de los sistemas vivos. Los aminoácidos son piezas importantes de nuestro puzzle, pero no nos dan la respuesta final. Sin embargo, hay que admitir que, a priori, no podríamos decir qué cabe esperar de este experimento. Podría haber ocurrido que los aminoácidos no aparecieran en absoluto, o que fueran completamente distintos de los que conocemos. Dado este desconocimiento previo, debemos admitir que el resultado de Miller implica una conexión entre la química de los sistemas inertes y la que mantiene en movimiento nuestras células: la primera precede a la segunda. ¿Qué ocurre con otras moléculas biológicas, en particular los componentes del alfabeto genético? Tan sólo seis años después, este problema fue abordado y resuelto con éxito por el bioquímico catalán Joan Oró (véase la figura 2.3).

En su infancia, Oró se había construido un laboratorio de química en el desván de su casa familiar en Lleida, a la vez que ayudaba en la panadería de su padre. Aunque intentó ganarse la vida como químico, tuvo que emigrar a Estados Unidos. En la época en la que Miller publicó su trabajo, Oró investigaba en la Universidad de Houston, donde estudiaba otros posibles escenarios de generación química de moléculas de tipo biológico. Después de varios intentos, durante la noche de fin de año de 1959, dejó funcionando un experimento con una mezcla de componentes simples, que incluía, además de los que había empleado Miller, ácido cianhídrico (HCN). Este componente es altamente reactivo y Oró intuía que podía tener un papel especialmente relevante. A la mañana siguiente el análisis de la muestra reveló la presencia abundante de adenina, una de las cuatro letras del alfabeto del código genético, como hemos visto en el capítulo anterior. Ésta fue la primera evidencia de que los bloques básicos del ADN también podían ser sintetizados de forma prebiótica y esta observación ha sido repetida después en numerosos experimentos, que han permitido crear las restantes letras del alfabeto y que también se han detectado a partir del análisis de meteoritos.

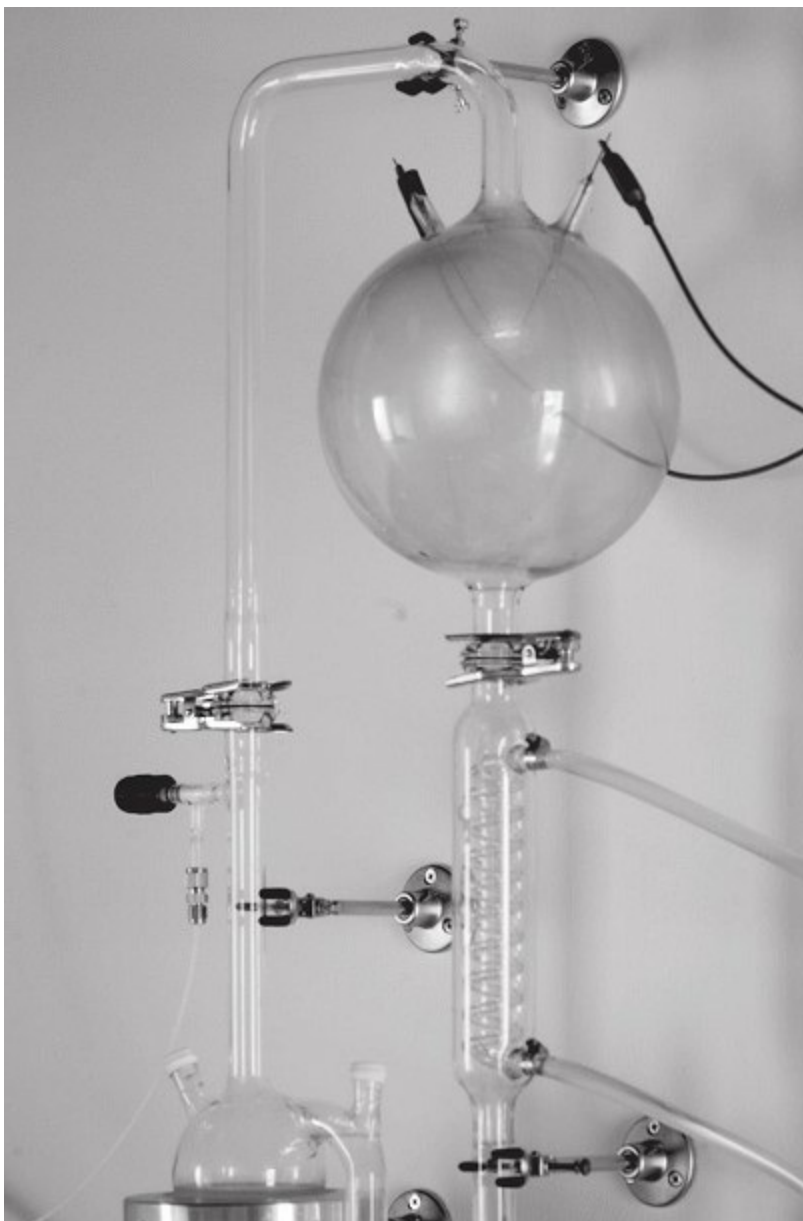


Figura 2.2. Una réplica del dispositivo empleado por Stanley Miller para sintetizar aminoácidos a partir de moléculas simples. La mezcla de moléculas simples es calentada en el matraz de la izquierda (abajo) y los gases ascienden hasta la zona de arriba a la derecha, en la que se producen descargas eléctricas. La mezcla gaseosa es licuada en el serpentín de la derecha (abajo) y el ciclo se cierra de nuevo. (Fotografía cortesía de Adam Brown.)

El artículo que describía este experimento, publicado al año siguiente al descubrimiento, tuvo un enorme impacto, y tan sólo un año después el mismo Oró propuso la posibilidad de que los cometas hubieran traído consigo grandes cantidades de agua y compuestos orgánicos sintetizados en el espacio. Esta teoría no tardó en comenzar a obtener el apoyo de diversas

fuentes, y su validez se ha ido confirmando posteriormente gracias al trabajo de investigadores de la talla de Carl Sagan. Durante las décadas posteriores a estos hallazgos, el estudio de la composición de las nubes de gas interestelar, cometas e incluso el entorno de estrellas evolucionadas muestra que contienen grandes concentraciones de HCN, así como centenares de moléculas orgánicas distintas, entre ellas muchas de las que se consideran precursoras de la síntesis de biomoléculas clave.

Estos estudios responden a una pregunta: los componentes básicos de las moléculas esenciales para la vida pueden crearse en condiciones razonables a partir de otras moléculas más simples que abundan en el universo. El universo de posibilidades moleculares que surge de estos experimentos no está compuesto de moléculas extrañas: son moléculas familiares, iguales o cercanas a las que constituyen los bloques básicos de la materia viviente. Pero la lista de aminoácidos del experimento no se limita a la veintena que emplean nuestras células para construir proteínas, y de hecho podríamos «fabricar» muchos otros miles. ¿Por qué entonces observamos los veinte que conocemos, y no otros? ¿Se trata de algún accidente evolutivo? Diversas investigaciones han proporcionado evidencia de que la lista de aminoácidos está lejos de ser arbitraria y un estudio llevado a cabo por Melissa Llardo, de la Universidad de Copenhague, y sus colaboradores ha demostrado que el conjunto natural es probablemente óptimo. Para ello, se ha empleado una lista de casi dos mil aminoácidos alternativos y a partir de ésta se han ensayado mediante ordenadores millones de combinaciones de veinte aminoácidos tal y como podrían obtenerse a partir de un código genético alternativo. Al estudiar en qué medida cada conjunto se comporta químicamente de manera favorable, los autores concluyen que la combinación de unidades que se da en la biología real es el resultado de procesos de selección natural, y que ofrece una de las mejores formas de obtener las propiedades químicas más apropiadas. En el universo vastísimo de posibilidades, los ladrillos de construcción de las proteínas definen una lista que probablemente es única. Ahora nos queda por dar un paso más: a partir de los aminoácidos podemos construir proteínas. ¿Y si las proteínas pudieran tener estructuras muy distintas de las que conocemos?



Figura 2.3. Joan Oró (1923-2004), en una imagen de su laboratorio con una colección de muestras de meteoritos. Oró fue el primero en proponer la idea de que durante el bombardeo de la Tierra a lo largo de millones de años, estos objetos y los cometas habrían traído gran parte del agua y posiblemente de la materia orgánica necesaria para la evolución de la vida.

Las proteínas son las nanomáquinas encargadas de la función celular. Son moléculas de tamaños muy diversos y llevan a cabo tareas muy variadas. Pueden actuar como el esqueleto que define la forma de la célula, como sistema de eliminación de otras moléculas, como señal de alerta, como software vivo que «habla» con el ADN (permitiendo que los genes se comuniquen entre sí) o ser empleadas como sistemas de transporte activo entre el interior de la célula y su medio externo. También permiten que las reacciones adecuadas mantengan nuestro metabolismo (y por tanto el flujo de materia y energía) activo. Todas estas funciones, además de otras muchas,

dependen de la creación (y degradación) de estas macromoléculas extraordinarias. En la figura 2.4 mostramos diversos ejemplos de proteínas importantes. Estos diagramas nos muestran el esqueleto básico de cada molécula, y podemos apreciar con facilidad la gran variedad de estructuras que van de moléculas pequeñas a estructuras de gran tamaño. Tenemos aquí varios ejemplos, como la mioglobina (pariente de la hemoglobina), la famosa proteína fluorescente verde, que se ha convertido en pieza clave en la visualización del mundo molecular vivo, o la ferritina, una esfera capaz de contener un gran número de iones de hierro para almacenarlos dentro de las células. La RubisCO, cuyo nombre completo es «ribulosa-1,5-bisfosfato carboxilasa/oxigenasa», puede sonarnos tan poco familiar como el nombre de un habitante del otro lado del planeta, pero deberíamos conocerla. Es la más abundante e importante para el mantenimiento de la vida en nuestro planeta, ya que es la principal responsable de la captura de dióxido de carbono durante la fotosíntesis. Otras proteínas se encargan de transportar moléculas a través de la membrana y tienen una forma inequívoca de tubos huecos, como la hemolisina, que se muestra en la figura en dos orientaciones. Otras, denominadas «factores de transcripción», poseen una estructura que las hace encajar a la perfección con la doble hélice del ADN, lo que las delata como proteínas capaces de «leerlo» e influir en la actividad genética. Algunos de estos factores, como p53, tienen un papel esencial en diversos procesos clave para la estabilidad celular. Cuando fallan debido a una mutación, la estabilidad puede perderse e iniciarse un proceso de crecimiento tumoral.

¿De dónde surge esta variedad? Una vez que se sintetiza la cadena de aminoácidos que representa la secuencia de la proteína (siguiendo el esquema de la máquina de Turing del capítulo anterior), ésta experimenta un proceso de plegamiento. La cadena lineal no puede llevar a cabo ninguna función, dado que es la forma que adquieren en el espacio la que les permite, por ejemplo, convertirse en poros o en sistemas de lectura. El proceso de plegamiento es espontáneo y conlleva diversas etapas en las que se produce la formación de bloques bien organizados a modo de módulos. A medida que pasa el tiempo, las interacciones entre distintas partes de la secuencia, pero sobre todo la tendencia de algunos aminoácidos a evitar el contacto con el agua, hacen que zonas distantes entre sí se atraigan y formen enlaces estables.

Sería algo así como empezar por una cuerda más o menos flexible que, cuando la compactamos, forma un ovillo con unas reglas de plegado bien establecidas, que siempre nos dan la misma forma final. Este plegamiento, en caso de no darse de forma correcta, puede generar una proteína que no sólo funciona de forma incorrecta, sino que puede dar lugar a enfermedades letales. Éste es el caso por ejemplo de la diabetes de tipo 2 o de algunas enfermedades neurodegenerativas, como es el caso del Alzheimer o la fibrosis quística, ambas mortales a medio o largo plazo.

Los biólogos moleculares suelen representar las proteínas de diversas formas, aunque la más popular es el denominado «diagrama de cinta», en el que en lugar de dibujar en detalle cada componente, se emplea una representación geométrica que nos muestra cómo se pliega en el espacio el esqueleto de la secuencia. Para adquirir estas formas diversas, se combinan dos tipos de cadenas plegadas de forma característica, que podemos apreciar en la figura anterior. Una tiene forma de hélice y la otra es una superficie casi plana. Las primeras se conocen como «alfa hélices» y las segundas como «hojas plegadas beta» y son fáciles de identificar. Las primeras se reconocen como hélices que se combinan de formas diversas y las segundas son parecidas a trozos de cinta más o menos planas. Combinando ambas formas, se obtienen todo tipo de estructuras, desde esferas a cilindros huecos. Es como si mediante la combinación de piezas formadas por estas dos formas de plegamiento, pudieran construirse todas las proteínas. Pero de nuevo podemos imaginar que otras muchas posibilidades podrían haberse dado en una evolución paralela. De ser así, el universo de las proteínas, aunque de enorme riqueza, sólo sería tal vez un caso particular de otras muchas formas de crear estas moléculas. Si alguna vez disponemos de una muestra de materia viva de otro planeta y encontramos proteínas, ¿seguirán este patrón?

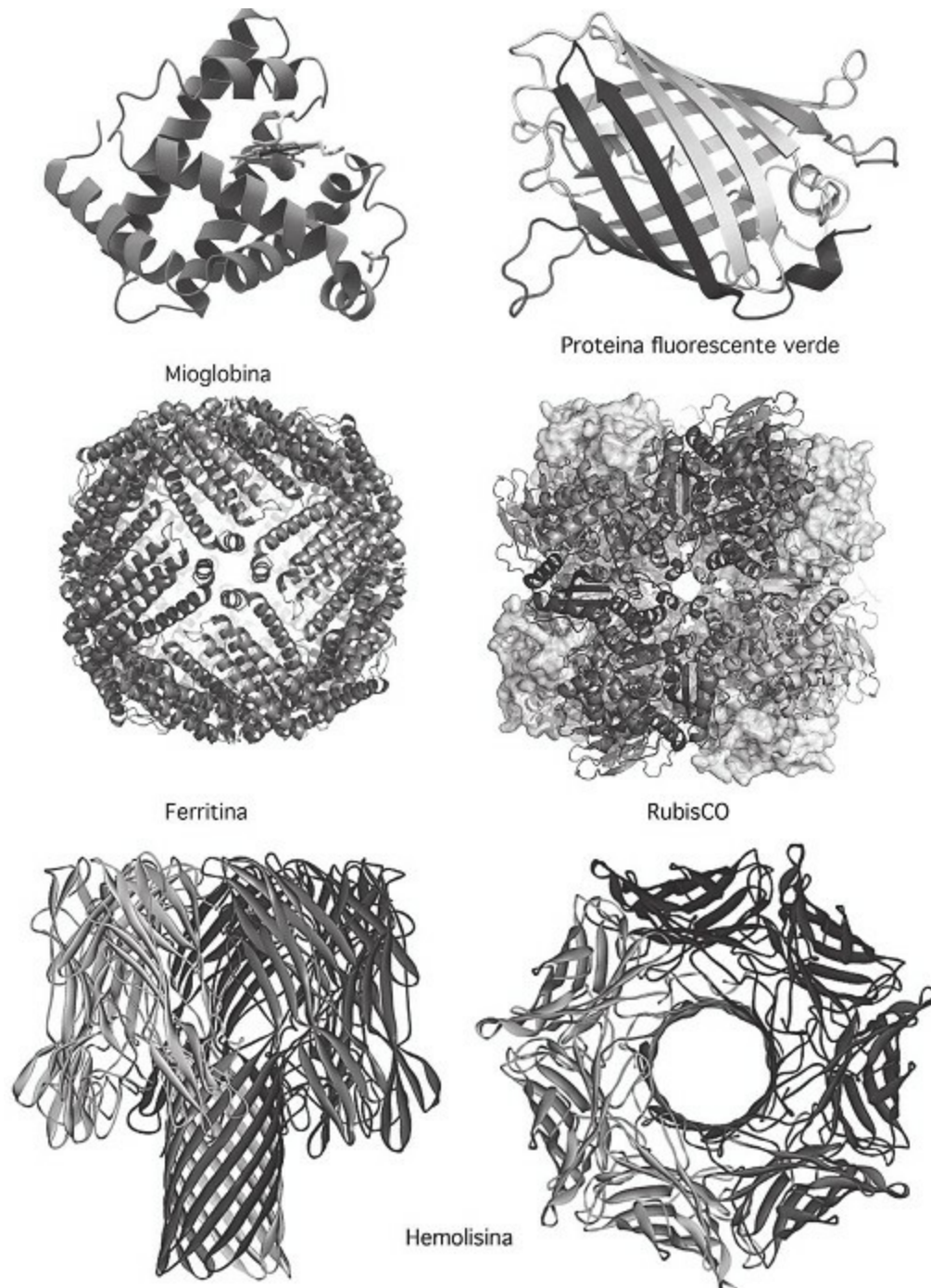


Figura 2.4. Las proteínas constituyen la maquinaria molecular que mantiene la estructura y funcionamiento de nuestras células. Distintas proteínas desempeñan diversas funciones, y presentan estructuras compatibles con éstas, algunas de las cuales se ilustran aquí.

Esta cuestión ha sido abordada por diversos investigadores, y su respuesta —muy sorprendente— la dieron dos físicos que exploraban precisamente la cuestión de la universalidad de las proteínas. Amos Maritan y Jayanth

Banavar se preguntaron qué tipo de estructuras se podrían obtener empleando un juego de piezas sencillas con las que se pudieran crear macromoléculas capaces de plegarse de forma compleja y diversa pero también estable (aunque no rígida). Para abordar el problema, decidieron emplear un modelo simplificado en el que no se introducen ni la química realista de los enlaces moleculares ni la estructura exacta de los bloques básicos de las proteínas. Por el contrario, Banavar y Maritan decidieron explorar el espacio de posibilidades de su modelo idealizado, en el que la complejidad química se reemplaza por la geometría y cada secuencia por una especie de tubo delgado y flexible (a modo de espagueti) que representaría el esqueleto de cada proteína. Uno de los motivos por los que esta idea tiene sentido es que sabemos que secuencias de aminoácidos muy distintas pueden plegarse exactamente de la misma forma, lo que sugiere que la estructura es más importante que la secuencia. En el estudio de estos físicos se reemplazaba cada molécula de aminoácido por una partícula ideal que se «conecta» con otras que serían sus aminoácidos vecinos. Empleando este modelo, vieron que los posibles tipos de plegamiento que dan lugar a estructuras estables están enormemente limitados en su repertorio de formas. Además, la teoría demuestra que las proteínas estables compatibles con las observadas en los sistemas vivos se dan en una zona de transición entre moléculas desplegadas y otras muy compactas. A medio camino entre ambos extremos existe una zona crítica en la que orden y desorden coexisten, permitiendo por un lado mantener la estabilidad de la forma a lo largo del tiempo (necesaria para que la proteína funcione bien) a la vez que es posible modificarla cuando sea necesario (y así presentar diversos estados posibles). El resultado del estudio teórico es contundente: las estructuras estables que necesitamos para construir estas «proteínas» virtuales se reducen a dos únicos tipos: hélices y cintas. Su longitud y combinación son además completamente consistentes con las de las proteínas reales, sugiriendo que, más allá de la forma exacta que permite a la naturaleza crear sus nanomáquinas más extraordinarias, éstas serán seguramente similares allí donde este tipo de moléculas hayan logrado aparecer.

La ciencia nos permite conjeturar con bastante seguridad que ciertas propiedades de las moléculas asociadas a la vida serán parecidas a las que conocemos en nuestro planeta. Aunque existirán sin duda diferencias, la química parece inclinar la balanza hacia la vida como un estado de la materia capaz de evolucionar y hacerlo mediante cadenas moleculares compatibles con un medio dominado por el agua. ¿Por qué cadenas?: porque sin secuencias capaces de almacenar diferentes tipos de información, no tendremos la flexibilidad que se requiere para evolucionar. La evolución es una parte imprescindible del proceso de cambio que produce en una biosfera donde prosperan algunas moléculas pero no otras. Sin la evolución, sin la selección darwiniana, no podríamos ir más allá de la sopa de moléculas diversas que surge de los experimentos que hemos descrito antes y que intentan imitar las etapas iniciales de la evolución molecular. La diversidad de moléculas es una condición necesaria, pero no suficiente, para alcanzar la barrera que define lo vivo. Para generar diversidad, necesitamos dos condiciones importantes. Ambas se dan en el experimento de Miller: la existencia de una fuente de energía y la presencia de agua como disolvente. La energía, y en particular una temperatura apropiada, afecta a la velocidad a la que tienen lugar las reacciones y también a la estabilidad de las moléculas. A muy alta temperatura o con la acción de fuentes de energía demasiado intensas, la complejidad de las moléculas puede verse seriamente reducida. Cerca de la mayoría de estrellas o del núcleo de la galaxia, donde la radiación es intensa, tan sólo las moléculas compuestas por dos o tres átomos son capaces de mantener a éstos unidos. Únicamente en el caso de que el calor intenso sea compensado por procesos de enfriamiento conseguimos que se formen moléculas de mayor complejidad.

Por otra parte, un medio en el que la temperatura sea demasiado baja raramente permitirá la evolución de complejidad molecular más allá de cierto punto. El frío puede ayudar a estabilizar moléculas complejas y evitar que se degraden, pero también lleva a ralentizar sus reacciones hasta el punto de eliminar toda posibilidad de cambio evolutivo. En algunas partes del universo, las nubes de gas interestelar muestran una gran diversidad de

moléculas orgánicas, pero esta diversidad es tan sólo el punto final de los procesos de reacción química. Ninguna forma de información o de selección será posible, ya que en último término el equilibrio químico es todo lo que se permite. Hay que señalar, sin embargo, que esta diversidad puede ser la clave para llevar a los precursores de la vida a otros mundos. Como sugirió el mismo Joan Oró en otro estudio pionero, los cometas podrían ser la fuente dominante de moléculas orgánicas que llegaron a nuestro mundo en sus inicios.

Para alcanzar la diversidad molecular que establece las bases de la biología, se requieren dos factores importantes. Uno es disponer de los elementos químicos adecuados que permitan crear moléculas complejas. El otro, que esta capacidad de diversificar dé paso a la selección de moléculas capaces de copiarse con mayor eficiencia. La primera condición parece obligarnos a admitir que el carbono es nuestro candidato ideal, y es probablemente el elemento estructural que la vida adoptará en otros lugares del universo. Por un lado, una clara restricción a lo posible viene dada por la disponibilidad de elementos, y especialmente de aquellos elementos que permitan combinarse con facilidad. El carbono es abundante y enormemente flexible a la hora de dar lugar a una gran variedad de estructuras. Cada átomo de carbono puede conectarse de diversas formas con otros átomos (hasta cuatro) y en particular con otros átomos de carbono. Algunos tipos de enlace son especialmente importantes para sostener una bioquímica compleja y eficiente.

A menudo se ha propuesto el silicio como una alternativa que la ciencia ficción ha explotado a conciencia. Este elemento, mucho menos abundante, posee también cuatro enlaces potenciales pero tiene la mala costumbre de combinarse de forma muy estable con el oxígeno, formando óxidos (los silicatos) que dan lugar a estructuras cristalinas de distinta complejidad. De hecho, estos cristales integran las formas de vida más importantes de nuestro planeta. En la figura 2.5 vemos algunas de las estructuras geométricas más espectaculares que forman la cubierta externa de las diatomeas, un grupo muy abundante de algas que pueblan nuestros océanos y que desempeñan un papel clave en la regulación del clima. Estos dibujos fueron llevados a cabo por Ernst Haeckel, el gran naturalista alemán que se hizo famoso, entre otras

cosas, por sus detalladas ilustraciones de organismos microscópicos. Aunque la diversidad de estructuras en este caso es impresionante, hay que recordar que se trata de cubiertas externas, y por lo tanto no es la base que sustenta las células que contienen. Pero lo peor en contra del silicio como clave de la vida es que, a medida que se crean cadenas más complejas, su estabilidad se reduce con rapidez. Una vida basada en el silicio debería superar numerosos obstáculos relacionados con su poca capacidad de actuar como molécula informativa y su poca flexibilidad para generar diversidad. Paradójicamente, si un extraterrestre analizara dentro de unos cientos de miles de años los restos de nuestra civilización, podría concluir que una parte importante de las formas de vida que habitaron la Tierra eran sistemas de gran complejidad basados en el silicio. La sobreabundancia de restos de placas de ordenador, radios o teléfonos con diseños prácticamente idénticos y en gran medida contruidos a partir de silicio indicarían que, de alguna manera, el mundo estuvo habitado por entidades muy regulares y que triunfaron ecológicamente, aunque una inspección rigurosa les demostraría que fueron en realidad creadas por seres inteligentes.

Cristales parásitos

En su novela *La amenaza de Andrómeda* (1969), Michael Crichton planteaba, en plena guerra fría, la posibilidad de una epidemia mortal causada por un organismo extraterrestre. Un grupo de científicos procedentes de campos muy diversos se reúnen en una instalación militar secreta para analizar y neutralizar esta nueva amenaza. El organismo en cuestión ha llegado a la Tierra en un satélite que ha caído cerca de un pueblo de Arizona y que unos chicos se han llevado a su casa para abrirlo, tras lo cual mueren de inmediato, con la dosis adecuada de sangre y gritos desesperados. Los investigadores descubren que se trata de un tipo desconocido de patógeno, al que denominan Andrómeda. Éste resulta tener una estructura geométrica muy ordenada, aunque las moléculas que lo componen no tendrían nada que ver con las que poseen los seres vivos de nuestro planeta. Pero esta distinción no hace al virus alienígena menos letal, sino todo lo contrario: prácticamente todos los que entran en contacto con Andrómeda mueren con gran rapidez.

Unas pocas excepciones (en el pueblo donde ha caído sólo hay tres supervivientes) nos recuerdan que la variabilidad genética humana hace posible que en una población grande algunos individuos sean resistentes incluso a los peores patógenos.

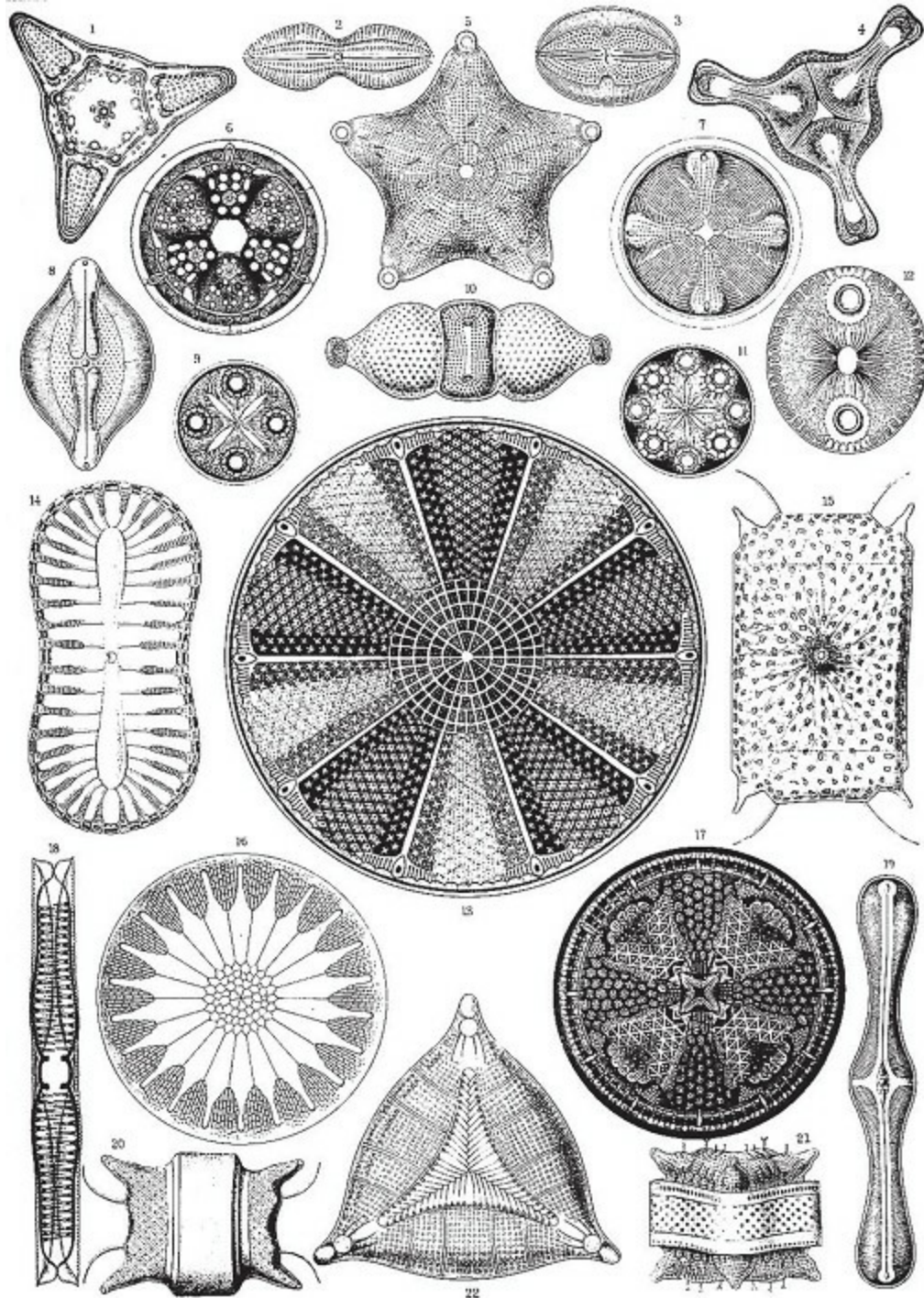


Figura 2.5. Un ejemplo de los dibujos creados por el zoólogo alemán Ernst Haeckel, en el que aparecen tipos muy diversos de los esqueletos externos de diatomeas. Estas algas unicelulares poseen una pared celular de óxido de silicio que las protege externamente y sirve para identificar distintas especies.

La otra cara de la moneda en la ficción nos la da *La guerra de los mundos*, de H.G. Wells. Después de ser invadidos por unas criaturas gigantescas que arrasan ciudades enteras y convierten en polvo a miles de humanos, cuando todo parece perdido, las criaturas empiezan a morir. ¿La razón? Tan simple como una infección que provoca una enfermedad mortal en los visitantes. Sin héroes que arriesgan sus vidas ni grandes planes bélicos para vencer a los alienígenas: el resfriado común terrestre es suficiente para acabar con ellos.

El relato de Crichton plantea la posibilidad de que el espacio albergue organismos capaces de infectar a seres humanos y provocar un desastre de enormes proporciones. Esta posibilidad y la de que puedan realmente ser traídos a la Tierra por una nave espacial o satélite artificial han sido consideradas seriamente durante décadas y forma parte de los protocolos que emplean las agencias espaciales. Por ahora resulta más importante la contaminación que la Tierra provoca en otros mundos, pero la posibilidad de que una sonda viaje a otro planeta y regrese con muestras del suelo o de algún océano (como puede ocurrir con los de los satélites Titán o Europa) nos obliga a reflexionar sobre la posibilidad de contaminación de origen biológico. Aunque los ensayos llevados a cabo por sondas no tripuladas pueden darnos mucha información valiosa, manipular directamente las muestras traídas del espacio permitiría tomar decisiones acerca de qué nuevos experimentos o análisis serían más adecuados. Entre otras cosas, porque los humanos somos increíblemente buenos a la hora de encontrar pistas a partir de detalles que se apartan de lo evidente o lo esperado.

Pero volvamos al problema del contagio. Aquí debemos plantearnos hasta qué punto es plausible esta situación. Si la vida capaz de desarrollarse en otros mundos es totalmente distinta de la que conocemos en nuestro planeta, entonces es muy probable que podamos descartar una pandemia de origen extraterrestre. Por el contrario, si los seres vivos se desarrollan y evolucionan a partir de algunas pocas formas, y además éstos comparten moléculas

similares e incluso mecanismos de crecimiento y división parecidos, entonces los relatos que hablan de un virus mortal proveniente del espacio tal vez no sean tan absurdos.

Para responder a esta cuestión necesitamos contestar a otra pregunta aún más fundamental: si la vida tiene sólo una forma de aparecer en nuestro universo, con rasgos, estructuras y códigos comunes. En ese caso, si un día nos encontramos ante su presencia, podremos detectarla, comprenderla y aprender de sus diferencias y similitudes. Si no es así, podríamos ser incapaces de reconocer una nueva forma biológica aunque la tuviéramos delante de nuestras narices. Incluso podría ocurrir que otras formas de vida existieran en nuestro mismo planeta y no las hubiéramos detectado. Esta idea, propuesta por el físico Paul Davies, sugiere que —al igual que otras innovaciones de las que hablaremos en este libro— la vida podría haber sido «inventada» en más de una ocasión durante la historia de nuestro mundo. A diferencia de los ejemplos que hemos discutido antes, basados o inspirados en las formas de vida que conocemos, Davies nos habla de una «biosfera en la sombra» que podríamos no haber detectado, precisamente porque no disponemos de una forma rigurosa de definir la vida. Tal y como señala este autor, descubrir una forma de vida distinta de la que conocemos habitando nuestro mundo tendría enormes consecuencias. En particular, demostraría que la vida es un fenómeno enormemente probable y, en consecuencia, deberíamos esperar que muchos otros mundos posean esta extraordinaria forma de materia, que tal vez sería inevitable.

Es difícil decir a priori si la conjetura de Davies debería ser tomada en serio. Personalmente, creo que podemos plantear dos argumentos en contra de esta idea. El primero se basa en la competencia por los recursos y el segundo en la señal que dejaría un sistema vivo en la composición química del planeta. La química que conocemos —y la conocemos bastante bien— nos proporciona una imagen razonable de la diversidad de moléculas que serían empleadas por formas de vida posibles. Si dos tipos de vida alternativos emplean las mismas moléculas, se produciría un efecto de competencia: los organismos de cada forma de vida deberían explotar las mismas moléculas. Este fenómeno es bien conocido en ecología, y tiene dos posibles resultados. En un caso, cuando la competencia por los recursos no es

muy intensa, ambas poblaciones pueden crecer y coexistir. En esta situación, deberíamos observar dos tipos de vida coexistiendo a la vez en nuestra biosfera, con poblaciones comparables. Está claro que la realidad es otra. Por otra parte, si la competencia es lo bastante intensa, la teoría ecológica nos dice que la coexistencia es imposible. En este caso, sólo una de las poblaciones (una forma de vida, en nuestro caso) se estabiliza mientras que la otra se extingue. Antes de que ello ocurra, las dos formas podrían haber evolucionado en paralelo, tal vez durante millones de años, antes de que la extinción se hiciera efectiva. De ser así, sería extraño no encontrar alguna marca fósil de la forma alternativa, aunque esta posibilidad no pueda excluirse. Se podría argumentar también que la hipótesis de compartir los mismos recursos es demasiado restrictiva. Y la objeción es razonable, dado que la vida en nuestro planeta ha logrado florecer explotando medios naturales en los que la luz y algunos gases moleculares son la materia prima, mientras que otras formas que habitan el fondo del mar lo hacen en un medio sin luz y con temperaturas extremas. Incluso sabemos ya que existen microorganismos que viven (realmente al límite) a kilómetros de profundidad bajo el suelo, en condiciones de extrema pobreza de recursos y dividiéndose no cada pocos minutos sino en una escala de años. Pero en todos los casos, se trata de la vida tal y como la conocemos.

El segundo argumento en contra proviene del hecho de que la presencia de un sistema vivo, como señalaron hace años James Lovelock y Lynn Margulis, crea un desequilibrio químico que deja una marca inequívoca en la composición molecular del ambiente en el que se desarrolla la vida. Estos investigadores plantearon una idea brillante destinada a servir de test para la presencia de vida en Marte. En un planeta inerte, esperaríamos encontrar ciertos gases en concentraciones altas como resultado de reacciones químicas que terminarían en un estado de equilibrio que podemos predecir a partir de reglas químicas simples. Es el caso de Venus y de Marte, nuestros dos vecinos más cercanos. Ambos experimentaron cambios profundos e irreversibles en un pasado remoto, al mismo tiempo que la vida florecía en nuestro planeta y cambiaba su superficie y atmósfera. Venus evolucionó hacia un estado dominado por temperaturas brutalmente altas y lluvias de ácido sulfúrico, mientras que Marte se precipitaba en una edad de hielo en la

que aún permanece. En ambos casos, pese a las enormes diferencias, los dos planetas poseen unas cantidades de dióxido de carbono muy elevadas, mientras que las de nitrógeno y oxígeno son casi irrelevantes. Por el contrario, nuestro planeta nos daría una señal (que veríamos desde el espacio) claramente distinta, casi invertida, con un dióxido de carbono muy poco representado, nitrógeno dominante y oxígeno abundante. Si existiera algún tipo de vida alternativa formando parte de nuestra biosfera, creo que deberíamos ser capaces de detectar también una señal de desequilibrio químico que señalara su presencia. Hasta ahora, esta señal no ha sido hallada.

Merece la pena señalar, para terminar esta sección, que estos desequilibrios y nuestra comprensión de la forma en la que la vida modifica el clima pueden servirnos para llevar a cabo el mayor experimento de la historia: transformar Marte para hacerlo habitable. La idea de «terraformar» el planeta rojo ha sido un viejo sueño que cada vez está más próximo, aunque hay que admitir que lo más probable es que nunca podamos llegar a convertirlo en nuestra casa. Imagino un futuro en el que el rostro de Marte cambie con la presencia de bacterias modificadas que habremos enviado para colonizar su superficie (y tal vez su subsuelo). Marte nos espera, pero dudo de que se deje conquistar. El planeta rojo ha sido siempre el candidato ideal de las novelas de ciencia ficción y para nuestros encuentros posibles con otras civilizaciones. Aunque soñamos con futuros en los que los humanos exploren los confines de la galaxia, lo más probable es que Marte señale la última frontera de la exploración que nos será permitida. Y no es el planeta con mares llenos de extrañas criaturas, ni siquiera el mundo en decadencia que Ray Bradbury describió como nadie en sus *Crónicas marcianas*. Marte es un lugar provisto de una atmósfera tan tenue que no nos dejaría respirar. Tan frío que nos congelaríamos en menos de un minuto si nos fallara el sistema de calefacción del traje espacial. Es un planeta que —como señalaba el escritor y divulgador científico Ed Regis— nos espera, sobre todo, para matarnos.

Sumergidos

Uno de los mayores avances de la física fue el descubrimiento de las llamadas líneas de absorción de la luz que los distintos átomos o moléculas emiten y que sirven para identificar su presencia incluso cuando se encuentran a miles de años luz de distancia. ¿Cómo sabemos, por ejemplo, que nuestro Sol (y casi todo en el universo) está compuesto esencialmente de hidrógeno y helio? Acercarse hasta allí a tomar una muestra parece casi una misión imposible. De hecho, en 1830 el filósofo Auguste Comte concluyó que, sin lugar a dudas, nunca podríamos saber de qué estaban hechas las estrellas. Pero aquí está la ciencia para rebatir lo que parece evidente: pocos años después de la muerte de este filósofo, se descubrió que la luz que proviene de una estrella, una vez descompuesta mediante un prisma, muestra una gran cantidad de líneas oscuras. Resultó que estas líneas son la marca precisa de la presencia de distintos elementos, y que por lo tanto el estudio de estas «líneas de absorción» permitía conocer exactamente la composición de estos objetos, aunque se encuentren a millones de años luz de distancia. Este descubrimiento, que abrió la puerta a una revolución en nuestra comprensión del universo, no es más que un ejemplo de cómo la aproximación científica nos permite deducir con precisión incluso aquello que parece inalcanzable. Entre las posibilidades que ofrece el estudio de las líneas de absorción, está la de detectar uno de los componentes clave de la vida: el agua. Nada menos que Leonardo da Vinci escribía sobre ésta, fascinado por su variabilidad y sus efectos:

El agua es a veces lacerante y a veces fuerte, a veces ácida y a veces amarga; a veces dulce, a veces gruesa o delgada; a veces se ve trayendo dolor o pestilencia; a veces da salud, a veces veneno. Sufre tantos cambios de naturaleza como son los diferentes lugares por los que pasa. Y como el espejo, cambia de color de acuerdo con el tema, por lo que altera la naturaleza de los lugares, llegando a ser apestosa, laxante, astringente, sulfurosa, salada, encarnadiza, triste, furiosa, enojada, roja, amarilla, verde, negra, azul, grasa; espesa o delgada.

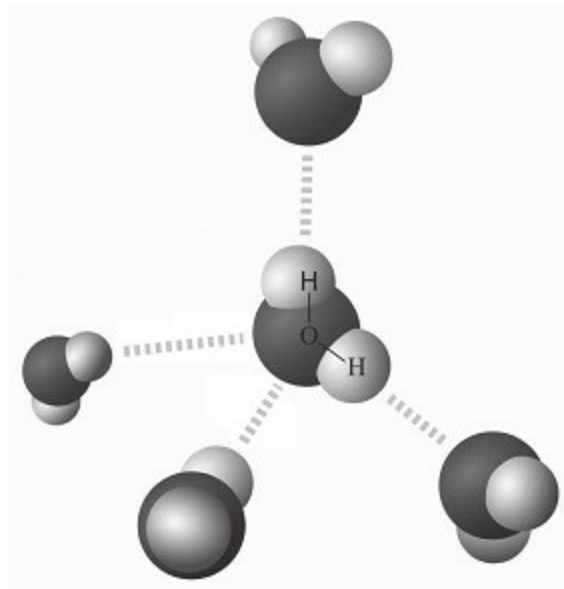
Aunque el genio lo desconocía entonces, en este texto, extraído de su *Tratado del agua*, Leonardo nos habla del agua habitada por la vida, que la hace cambiar de color, olor o textura. Esta agua, pestilente o dulce, y que es imprescindible para vivir, está siempre habitada por microorganismos. Este mundo paralelo y desconocido no vio la luz hasta la llegada del microscopio. La vida microscópica crece gracias a la presencia del agua, pero el agua

también puede convertirse en un veneno. Si queremos evitarlo, no hay más remedio que convertirla en un infierno, y eso se consigue llevándola a la ebullición.

Nuestro interés por una molécula tan simple (véase la figura 2.6) está justificado cuando nos detenemos a comprobar su importancia. No sólo ocupa la mayor parte de nuestro volumen corporal (somos, sobre todo, agua), sino que la inmensa mayoría de los procesos que permiten mantener esta fase de la materia que denominamos «vida» requieren del agua como soporte vital. La presencia de una fase líquida es necesaria para permitir que materia y energía puedan entrar en nuestras células e interactuar con cientos de millones de moléculas complejas y simples. El agua, lamentablemente, también ha sido y es empleada por todo tipo de farsantes para estafar a consumidores que buscan «lo natural». Así, hay tiendas que, además de ofrecer horóscopos y masajes, venden botellitas de agua de mar que al parecer pueden mejorar la salud y hasta curar enfermedades aunque, por supuesto, no exista la más mínima prueba de ello. Como ocurre con la homeopatía, el producto combina una completa falta de utilidad con un precio exorbitante. Sus defensores suelen invocar misteriosas fuerzas que por desgracia no pueden ser detectadas, aunque lo realmente misterioso es por qué los responsables de estas patrañas no están en la cárcel.

Pero, volviendo a la filosofía de este libro: ¿es el agua la opción más probable para permitir la aparición de vida? Es una pregunta importante para la búsqueda de vida en nuestro sistema solar así como en planetas extrasolares. La posibilidad de que Marte haya sido la cuna de la vida cuando poseía agua abundante, anima las esperanzas depositadas en las numerosas misiones enviadas al planeta rojo en busca de evidencias de alternativas a nuestra biosfera. Pero también es posible que algún tipo de microorganismo habite los océanos bajo el hielo de algunos satélites de Júpiter o Saturno. En cualquier caso, se identifica a menudo esta presencia de agua con una mayor probabilidad de hallar formas de vida o, al menos, su huella pasada. Pero cabría pensar (volviendo al chiste del principio del capítulo) que tal vez el énfasis en el agua o incluso en un líquido en general sea exagerado. Una fase líquida facilita las reacciones químicas, dado que dentro de ésta se pueden desplazar los componentes disueltos. Sin reacciones químicas ningún tipo de

vida es posible. Por supuesto que estas reacciones también se dan en sólidos o en gases, pero la posibilidad de sostener la complejidad de un sistema vivo en los primeros es muy limitada, mientras que el desorden molecular de los segundos impide formar cadenas de gran longitud y en particular mantener grandes complejos moleculares (como una membrana cerrada) de forma estable. Por lo que sabemos hasta hoy, una fase líquida es más que deseable si queremos combinar la flexibilidad de un medio en el que los componentes pueden encontrarse para reaccionar y a la vez preservar el orden necesario para mantener células u otras superestructuras. Ahora bien, aún tenemos más preguntas: ¿y si otras moléculas capaces de actuar de disolvente fueran igualmente válidas —o mejores— como matriz de los procesos biológicos? Ha llegado el momento de comparar a los mejores candidatos y averiguar qué tiene de especial, tal vez único, el líquido elemento.



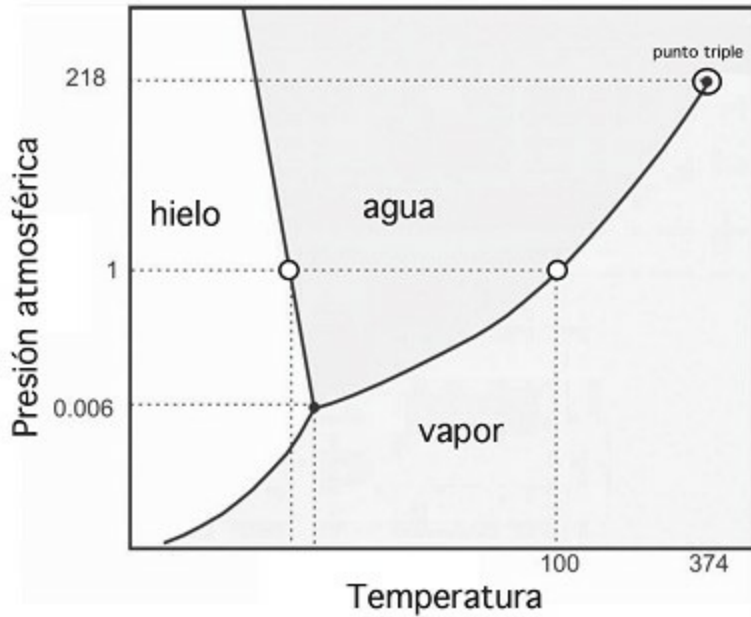


Figura 2.6. Arriba: modelos moleculares de agua y sus interacciones. Las líneas discontinuas indican puentes de hidrógeno (enlaces entre moléculas que tienden a mantenerlas unidas). Abajo: diagrama de fases del agua, en el que distintas líneas separan las tres fases principales. Los círculos blancos indican el rango de temperaturas a las que (para una presión de una atmósfera, al nivel del mar) el agua permanece en estado líquido.

El agua es una molécula peculiar, con muchas propiedades únicas. En la figura 2.6 vemos unos modelos de moléculas de agua dispuestos en el espacio como se orientarían en condiciones normales. Es una molécula polar: sus cargas se distribuyen de manera que hay una asimetría que hace que una parte de la molécula sea positiva y la otra negativa. Ello ayuda a que las moléculas se orienten entre sí de manera más o menos regular, formando cristales hexagonales cuando se congela. La polaridad es también la clave de muchas de sus propiedades más interesantes biológicamente, ya que las cargas crean enlaces entre moléculas (los llamados puentes de hidrógeno) que son débiles de forma individual, pero que pueden propiciar una gran estabilidad cuando los consideramos en su conjunto. Estas y otras propiedades hacen que nuestro líquido favorito posea en particular una enorme estabilidad dentro de un intervalo de temperaturas muy amplio. A nivel del mar, la encontraremos en este estado en un rango de cien grados (que arbitrariamente hemos definido en una escala de cero a cien). En la figura 2.6 se muestran las distintas fases del agua en un diagrama en el que cada punto corresponde a una temperatura

y una presión dadas. En distintas zonas encontramos las tres fases familiares (hay muchas más) separadas por curvas de transición. Entre otras anomalías de gran importancia está la menor densidad del hielo en relación con el agua, lo que le confiere la capacidad de flotar sobre ésta. Podemos imaginar otras moléculas que actúen como disolventes alternativos, y algunas de ellas están presentes en abundancia en otros mundos, como mencionábamos al principio. ¿Serían igualmente favorables para la aparición de la vida los mares de metano o amoníaco? Ambas sustancias se componen también de moléculas pequeñas, pero en muchos sentidos carecen de las grandes ventajas y versatilidad del agua. En primer lugar, los rangos de temperatura en los que permanecen líquidos son muy distintos, más limitados y sobre todo pertenecen al dominio de las temperaturas extremas. Pero carecen además de las propiedades de polaridad y flexibilidad química y física del agua. En este sentido, juegan en contra tanto las condiciones de baja temperatura, que hacen lenta o improbable la capacidad de reacción, como las limitaciones que experimentarían las posibles moléculas resultantes de las reacciones, que difícilmente podrían evolucionar e incluso replicarse.

Se suele decir que somos sobre todo agua. Y así es; pertenecemos al océano primitivo del que la vida surgió y la vida desaparecerá por completo cuando nuestro Sol muera y arranque la última gota de agua de nuestro planeta. En el agua que ya no existe, la que permitió la aparición de la célula a la que estamos conectados a través de una cadena de millones de ciclos de crecimiento y división, tuvo lugar el primer acto del drama evolutivo. Nadie nos puede devolver a aquel momento ni podremos saber nunca con seguridad qué ocurrió en aquella Tierra aún bombardeada con violencia por innumerables meteoritos. Pero las huellas de aquel momento singular, del mundo ancestral en el que todo empezó, han quedado capturadas de forma invisible en el interior de todas y cada una de nuestras células. Al estudiar la composición del interior de la célula, podemos determinar la presencia de distintos elementos, que a veces nos dan informaciones muy valiosas sobre los orígenes evolutivos de distintos grupos. La sorpresa surge cuando determinamos estas concentraciones en el fluido que rodea el núcleo, que llamamos citoplasma.

A principios del siglo xx ya se había comprobado que la concentración de sales del citoplasma es muy distinta de la observada en nuestros océanos actuales. El bioquímico canadiense Archibald Macallum fue el pionero en el estudio de la presencia de elementos químicos y sales en los fluidos biológicos como la sangre. Sus métodos le permitieron demostrar que en muchos animales vertebrados la frecuencia con la que encontramos sodio, potasio, calcio y magnesio es muy similar a la que se halla en el mar, lo que se ha empleado como un argumento (entre otros muchos) a favor del origen marino de los vertebrados terrestres. Esta similitud contrasta con la anomalía que se observa al estudiar el citoplasma: todas las células actuales poseen mucho más potasio, fosfato y diversos metales como el zinc de lo que podemos encontrar en los mares, lagos y ríos actuales. Las células modernas son capaces de mantener diferencias de concentración de distintos iones entre el interior y el exterior del citoplasma. Estas diferencias son, en buena medida, la clave del mantenimiento de la vida misma, y podríamos afirmar, sin equivocarnos demasiado, que la muerte celular se produce cuando desaparecen las diferencias. Éstas permiten mantener en marcha muchas de las proteínas de membrana de las que hablábamos antes, pero estas proteínas (los canales de calcio, por ejemplo) no existían cuando las primeras células aparecieron en la Tierra.

Estas protocélulas difícilmente podrían evitar el flujo a través de sus membranas de pequeñas moléculas e iones, y en consecuencia sus concentraciones debieron de ser similares a las del medio exterior en el que vivían las células primordiales. Diversos estudios pormenorizados, llevados a cabo por el biólogo Eugene Koonin y sus colaboradores, demostraron que aquellas células originales no surgieron (como se solía creer) en el mar primitivo, sino muy posiblemente en estanques de aguas poco profundas y con abundante vapor de agua, así como energía de origen geotérmico. Estas condiciones, sumadas a la ausencia de oxígeno y altas concentraciones de dióxido de carbono, que pueden ser reconstruidas y comparadas con otras fuentes de información, explican la anomalía del citoplasma y le dan un significado profundo. Las condiciones de aquellos estanques dieron lugar a la química en la que evolucionaron las células ancestrales, que más tarde se expandieron por los mares primitivos. Ésta fue, de hecho, una de las ideas

revolucionarias que el genial Charles Darwin planteaba en *El origen de las especies*, una obra en la que ya especulaba con la posibilidad de la aparición de los sistemas vivos en el interior de «pequeñas charcas calientes». Durante miles de millones de años, la composición apenas ha cambiado, y la huella inicial de sus orígenes permanece. El agua que rellena estas pequeñas fábricas extraordinarias en constante movimiento trae consigo una parte de la memoria de un planeta muy distinto al que vemos hoy, el mundo perdido molecular al que ninguna máquina del tiempo podrá devolvernos.

3

Cantos de sirena

El ser humano sabe por fin que está solo en mitad de la inmensidad del universo, del cual ha surgido como resultado del azar.

Jacques Monod, *El azar y la necesidad*

Quería encontrar los límites de la plasticidad de las formas vivas.

H.G. Wells, *La isla del Dr. Moreau*

Sirenas

En 1822, el capitán británico Samuel B. Eades, que en aquella época estaba al mando del *Pickering*, un barco mercante con el que había viajado por las costas del sureste asiático, recibió una oferta poco corriente. Durante uno de sus viajes, asistió a una sesión privada en la que exhibían lo que parecía ser una sirena disecada que, se decía, había sido capturada cerca de la costa de Japón. Eades quedó tan impresionado por aquella maravilla que decidió comprarla pagando una pequeña fortuna. La magnitud de su asombro queda bien manifiesta por el hecho de que, para poder cerrar el trato, vendió sin permiso el barco —aunque no era su propietario— y decidió dedicarse en cuerpo y alma a exhibir aquel fantástico ser. Tan sólo unos meses después de su adquisición, Eades ya estaba sacando réditos de su hallazgo en Londres, donde la sirena (figura 3.1, izquierda) muy pronto causó sensación. Durante un tiempo aquel fenómeno reinó como atracción indiscutida entre los habitantes de la ciudad y, aunque generó algunas suspicacias, se mantuvo en el candelero a lo largo de una temporada. Aquella criatura de aspecto

torturado se parecía poco a la imagen que nos ha dejado la narración de la *Odisea*, en la que las sirenas son mitad peces, mitad mujeres voluptuosas de voz cautivadora. Por el contrario, el rostro reseco de la sirena de Eades era el de un simio acuático con una inquietante expresión de terror.

No era la primera vez que se hablaba de la existencia de sirenas. Su avistamiento por marineros y pescadores ya formaba parte de la leyenda popular, junto con otros seres de leyenda como el Kraken, nombre por el que se dio a conocer a uno de los animales más temibles que, se decía, era responsable de ataques a barcos en alta mar. Las descripciones del Kraken nos hablan de un pulpo gigante, con un tamaño comparable al de los barcos de la época. En la misma época en la que Eades descubre y presenta en sociedad a su sirena, fallece en París el zoólogo Pierre Denys de Montfort, un experto en moluscos que había dado credibilidad científica al Kraken al incluirlo en su enciclopedia sobre este grupo de invertebrados, en la que nos encontramos un dibujo de una especie de pulpo gigante cuyos tentáculos abrazan un barco. Jules Verne fue uno de los muchos que se tomaron muy en serio las descripciones de Montfort, que le inspiraron para su novela *Veinte mil leguas de viaje submarino*. En vida de Montfort se habían descrito diversos ataques a buques y pescadores y Montfort les dio credibilidad, hasta el punto de afirmar que diez barcos de guerra británicos que habían desaparecido en 1872 se habían hundido por el ataque del monstruo marino. Cuando se supo que en realidad habían naufragado debido a un huracán, el prestigio de Montfort cayó en picado y terminó sus días en la pobreza más absoluta. Sin embargo, el tiempo le dio la razón: el Kraken era algo más que una leyenda. Hoy sabemos que una de las criaturas más enormes que habitan nuestros océanos existe realmente: es el calamar gigante, cuyos restos habían sido hallados en diversas ocasiones y que en 1857 fue finalmente reconocido. Desde entonces, esta especie huidiza y difícil de observar en su medio natural, ha seguido dejando ejemplares de enorme tamaño (algunos han llegado a alcanzar los 20 metros). No ocurrió lo mismo con las sirenas.

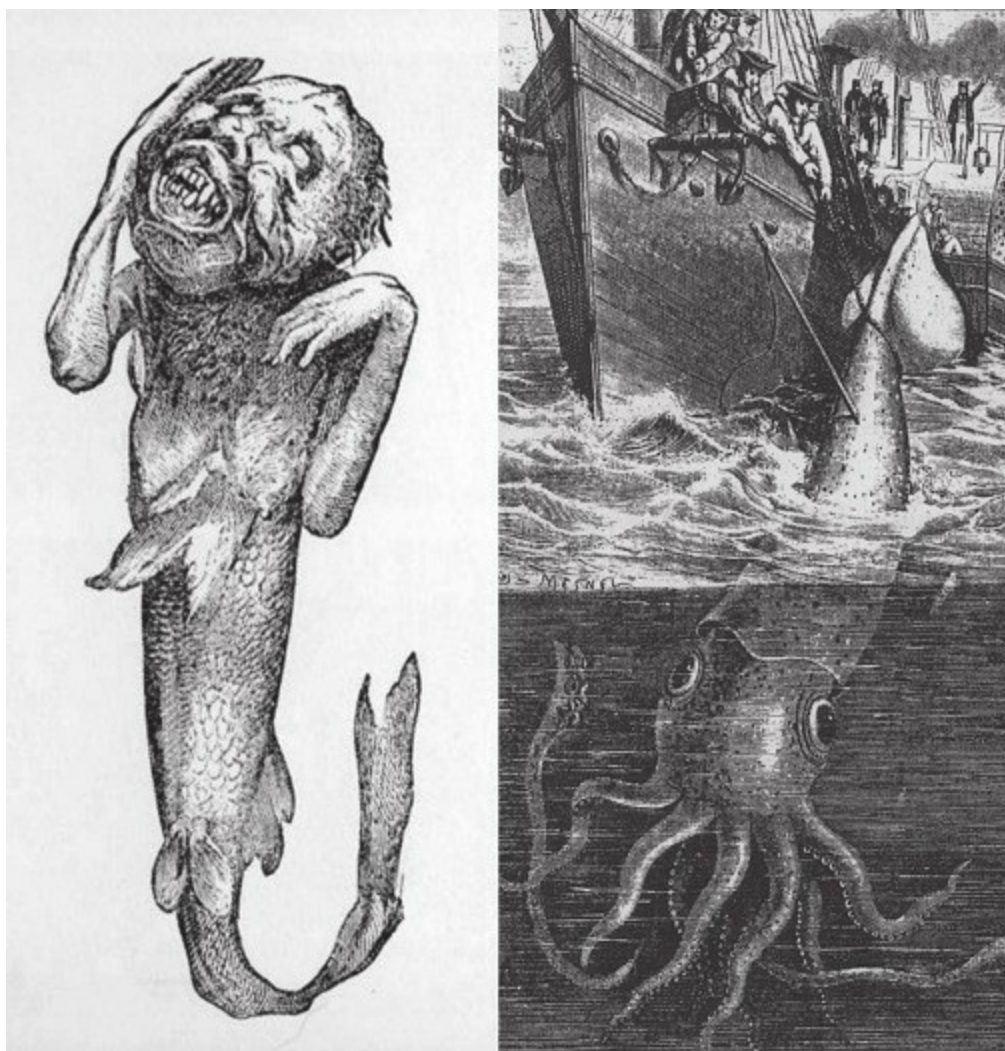


Figura 3.1. Las sirenas y otros seres imaginarios son contemporáneos de la exploración del mundo. Con mucha frecuencia eran dibujados a partir de supuestos avistamientos en alta mar o simplemente reconstruidos a partir de relatos de origen muy diverso. A la izquierda vemos un dibujo de la sirena del capitán Eades. A la derecha, un grabado en el que se representa la captura de un calamar gigante, que muy posiblemente sirvió de inspiración a la leyenda del Kraken.

En algunos textos escritos por médicos y zoólogos de la época, se comentaba en no pocas ocasiones el estudio de ejemplares de animales con cuerpo humano y cola de pez, y existían relatos detallados sobre su presencia en distintos lugares. La sirena de Eades tampoco era la primera que había sido expuesta al público. Pero el impacto social de este ejemplar, exhibido en una de las ciudades más importantes del mundo y con una prensa ávida de sensacionalismos, fue enorme y no tardaron en acercarse algunos expertos naturalistas para averiguar la veracidad de su naturaleza. Eades estaba tan

convencido de que la sirena era real que él mismo se puso en contacto con especialistas para que la examinaran. En un arranque de optimismo, contactó con un científico de la Royal Society que debía verificar su autenticidad. Pero el resultado fue el contrario: aunque el autor de aquel fraude había sido muy hábil, lo que había hecho era un montaje en el que se combinaban partes de varios animales, como el torso y la cabeza de un orangután hembra al que se había reemplazado la mandíbula por una de babuino. El cuerpo se había cosido muy profesionalmente a la cola de un pez de gran tamaño, probablemente de la familia de los salmones. Se habían cuidado diversos detalles, como la conexión entre la espina dorsal del pez y la del orangután, dando una convincente sensación de continuidad. Aunque nuestro capitán intentó ignorar aquel juicio negativo, las sospechas de fraude no dejaron de crecer. Aquel engaño aún tuvo sus momentos de gloria, pero el declive de su fama se hizo inevitable y acabó cayendo en el olvido durante décadas, para ser rescatada todavía durante un tiempo por nuevos propietarios igualmente crédulos o simplemente hábiles. Al final, aunque otros casos parecidos surgieron aquí y allá, las sirenas regresaron —al menos por ahora— al universo de la imaginación. Emergen sólo de vez en cuando, normalmente de noche, atravesando programas de televisión en los que conviven —junto con una completa falta de sentido común— con platillos volantes surgidos de pirámides mayas o cazadores de vampiros.

Esta historia nos remite al mundo de los mitos y leyendas en el que las criaturas extraordinarias han desempeñado siempre un papel central como depositarias de la sabiduría, provocadores del horror, representantes de algún dios más o menos intolerante o garantes de la justicia. Su diversidad es muy notable, y abarca leones o caballos alados, águilas con cuerpo de león, hombres con cuerpo de caballo, caballos con un largo cuerno que surge de sus cabezas, perros con tres cabezas o criaturas de cuya cabeza surgen decenas de serpientes. Pero hay algo que los une a todos, relacionado con sus principios de diseño: la gran mayoría son combinaciones más o menos afortunadas de diversos animales. Esta pauta es prácticamente universal y no deja de reaparecer en el mundo del arte o la literatura. Los ejemplos son innumerables y entre ellos se cuentan también diversas modificaciones de la lógica del diseño corporal. Es el caso del cíclope que aparece en la *Ilíada* (o

del divertido personaje con un único ojo de la película *Monstruos. S.A.*, de Pixar). Pero podemos citar muchos otros, como por ejemplo algunos cuadros y grabados de El Bosco o de Brueghel, en los que aparecen criaturas con dos piernas y una cabeza (sin tronco ni brazos), pájaros de dos cabezas, perros de tres y peces con alas. En estos casos, en lugar de una simple combinación, se dan variaciones de forma, dimensiones o estructura de seres humanos o animales, en los que las proporciones o hasta la presencia de algunas partes se barajan de forma extrema.

¿Son estas posibilidades accesibles tan sólo en el mundo de la imaginación? Algunos artistas han retomado los viejos mitos y han intentado acercarse a los animales imposibles siguiendo una aproximación naturalista. En la figura 3.2 vemos un dibujo de Tim Cook que intenta recrear el esqueleto de una sirena como podría haber existido si alguna vez hubiera sido real. Pero estas representaciones anatómicas no resuelven la cuestión que sirve de argumento a este libro. ¿No observamos sirenas ni leones alados porque son imposibles o —tal vez— porque no tuvieron la oportunidad de aparecer a lo largo de la evolución? Dado que una buena parte de lo que representa la vida en nuestro planeta tiene que ver con su enorme diversidad, comprender sus límites es parte de nuestra ambición de entender la capacidad creativa de la materia viva. Y más aún cuando, a principios del siglo XXI, se inicia la carrera por crear una nueva forma de ingeniería: la que emplea células y tejidos como elementos base para construir y reconstruir nuestros cuerpos a la vez que plantea la creación de nuevos organismos. ¿Seremos capaces tal vez de crear sirenas, o nos enfrentaremos a barreras infranqueables? En este sentido, debemos decir que, si bien las sirenas no existen, se han dado procesos de evolución que han originado organismos no menos espectaculares, como los cetáceos, que incluyen las ballenas entre otros grupos. ¿Cuál es su origen? Debemos recordar que la Tierra fue colonizada por descendientes de los peces que conquistaron los continentes sobre los que mucho después surgieron los dinosaurios y los mamíferos. Puesto que las ballenas son mamíferos, la evolución de los cetáceos necesariamente requirió que algún grupo se fuera adaptando al ambiente marino, de algún modo regresando al mar del que partieron sus ancestros. Estos procesos, como sabemos ahora, se inician hace unos 48 millones de

años. Diez millones de años después, los antecesores de los gigantes marinos ya ocupaban los mares de todo el planeta. Podría imaginarse un proceso similar en el que esta evolución de la tierra firme al medio acuático hubiera dado lugar a animales similares a las sirenas. Aunque es difícil imaginar cómo un ser bípedo podría terminar viviendo en el mar manteniendo sus brazos pero perdiendo sus piernas, no podemos descartar esta posibilidad en un mundo alternativo.

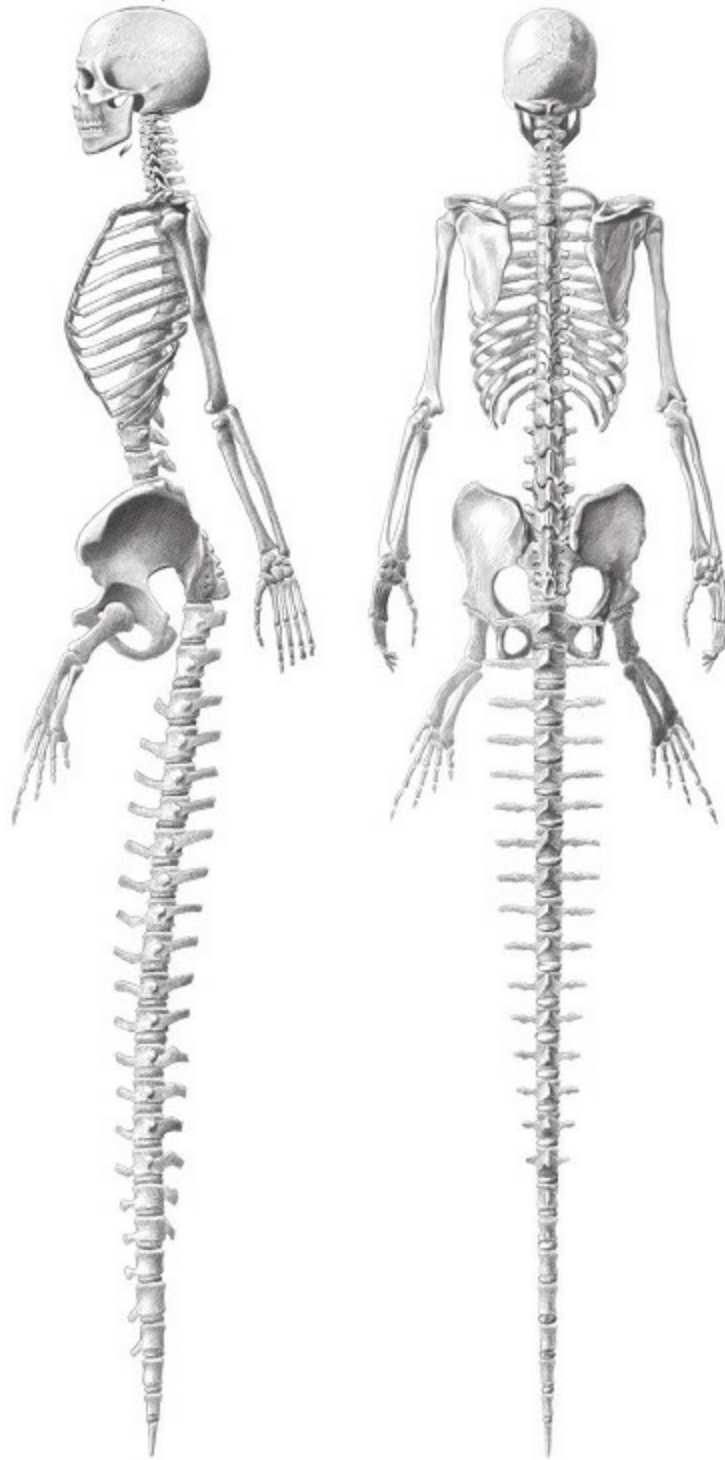


Figura 3.2. Una representación anatómica moderna de una hipotética sirena. En este caso, se ha intentado respetar la organización del esqueleto conectando un tronco humano con una parte inferior que correspondería a la cola de pez. (Dibujo reproducido por cortesía de Tim Cook.)

Lamentablemente, la mitología no sólo se nutre de la imaginación. A lo largo de la historia se han ido acumulando numerosos ejemplos de «monstruosidades» que surgen de los errores en el desarrollo embrionario, como es el caso de las duplicaciones faciales (figura 3.3). El cirujano francés Ambroise Paré escribió en el siglo XVI acerca de las causas de estas anomalías en su libro *Monstruos y prodigios*. En el primer capítulo de esta obra, titulado «De las causas de los monstruos», Paré hace una lista de causas, algunas razonables, como «enfermedades hereditarias» o accidentes sufridos por la madre durante el embarazo. Otras hacen referencia a «la gloria de Dios», o a su cólera, así como a razones no menos peregrinas, como «el engaño de malvados mendigos itinerantes» y por supuesto demonios y diablos, pero también invoca «la imaginación». Si bien Paré apunta algunas ideas que intentan relacionar la ausencia de partes o la sobreabundancia de éstas con «la falta o exceso de semen», la mayoría de razonamientos resultan un tanto cómicos. En relación con la imaginación, cita el caso de una niña que nació «peluda como un oso» debido a que su madre se había deleitado muy a menudo mirando un cuadro con una imagen de san Juan vestido con pieles sin curtir. Otro niño, nacido con «rostro de rana», se cita como resultado de un tratamiento para la fiebre en el que la madre debía sujetar en una mano una rana viva hasta que ésta muriera. Paré nos dice que «por la noche fue a acostarse con su marido, con la rana aún en la mano; ambos se abrazaron y ella concibió, y así se creó este monstruo por la virtud imaginativa». Dejo al lector cualquier valoración acerca de este *ménage à trois* un tanto inverosímil. El libro de Ambroise Paré es una lectura de un gran valor histórico, pero también un recordatorio de lo afortunados que somos de disfrutar de la ciencia y la razón.

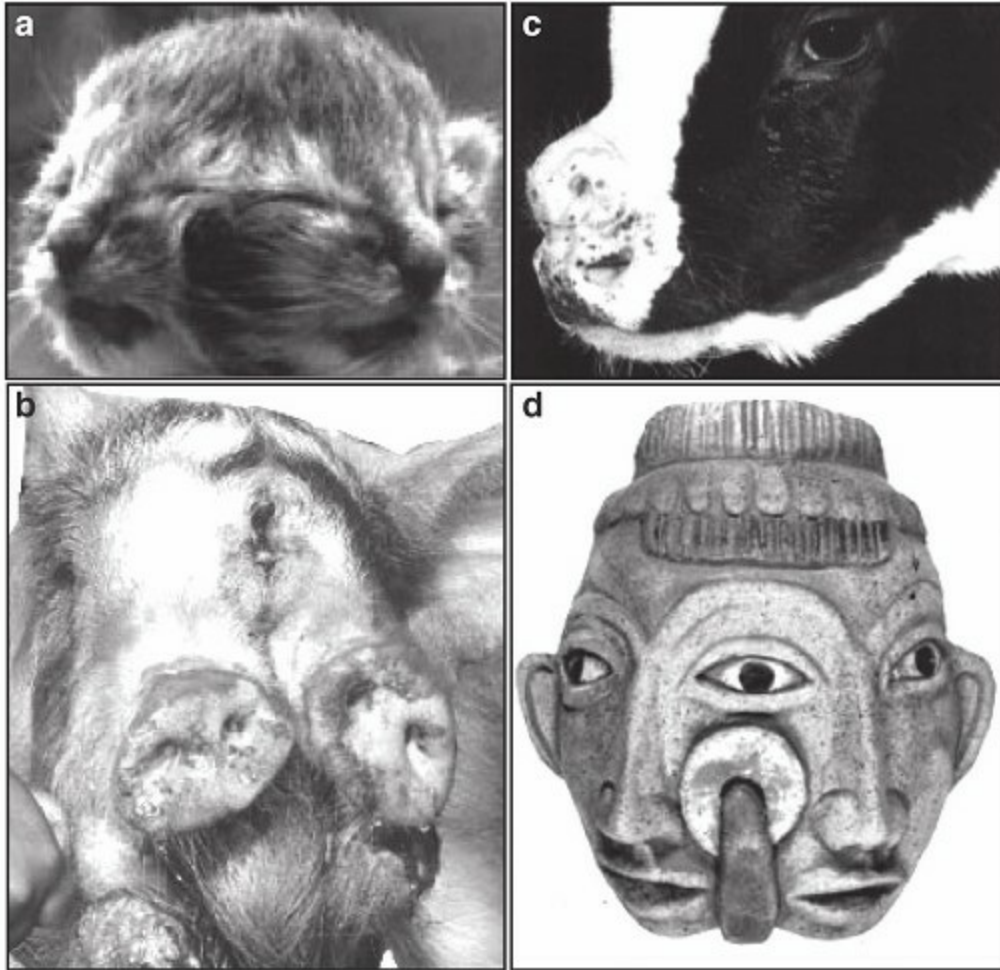


Figura 3.3. Las duplicaciones y fusiones de caras son las monstruosidades más comunes que se dan en la naturaleza y también como inspiración en el arte, especialmente en algunas culturas. Aquí vemos: (a) una cara doble, (b, c) un morro duplicado y (d) una representación de un rostro humano en una máscara. (Imagen tomada de Helms y Schneider, 2003.)

Al margen de la peculiar obra de Paré, otros esfuerzos en la dirección de comprender el origen de los monstruos han permitido arrojar una luz insospechada sobre la «lógica de los monstruos» de la que hablaba Pere Alberch. Tal y como mencionábamos en nuestra introducción, cuando se llevó a cabo un estudio pormenorizado de los tipos de monstruosidades, se observó que no todas son posibles. Como si incluso el reino de lo anómalo estuviera limitado por leyes estructurales que van más allá de la selección natural y la evolución. Y así es. Los ejemplos que aparecen en la figura 3.3 son enormemente comunes y nos hablan de monstruosidades que parecen basarse en la creación de simetrías. Cuando hacemos un inventario de qué

tipos de anomalías existen, nos quedamos siempre confinados en imágenes especulares simples, duplicaciones, pero no tres copias. Existen excepciones, pero son realmente raras. Hay una lógica en las leyes básicas de desarrollo de las formas que restringe el universo de lo posible. La aproximación de Alberch y otros investigadores fue demostrar la existencia de límites en la geografía de las formas. Vamos a ver dos casos ilustrativos. El primero afecta a cómo se forman las estructuras que habitan en los límites de la vida. El segundo, a uno de los objetos más interesantes y complejos que ha creado la evolución, y que le permiten al lector leer ahora mismo estas líneas.

Virus platónicos

Hemos hablado en el capítulo anterior de los virus. Una propiedad a primera vista sorprendente de la mayoría de éstos (y también de sus contrapartidas literarias, como *Andrómeda*) es su enorme regularidad. Cuando vemos por primera vez una imagen o esquema de un virus que infecta bacterias (el famoso bacteriófago o simplemente «fago») es probable que nos pase por la cabeza la idea de un robot microscópico. En la imagen de la figura 3.4a vemos una reconstrucción del fago T4, muy conocido por los virólogos, así como una imagen de microscopio electrónico de un gran número de estos virus infectando una bacteria (figura 3.4b) a la que se adhieren mediante sus seis «patas» que le dan un aspecto de nave espacial. En la parte de arriba del virus vemos una «cabeza» muy regular que también apoya la idea de un diseño inteligente y en cuyo interior se oculta el material genético del virus, que será inyectado dentro de la célula gracias a otro artilugio que permite hacer este proceso de transferencia del ADN viral a su huésped. Una vez dentro de la célula (utilizando las proteínas de ésta) se copiará dando lugar a una progenie de nuevos virus, destruyendo la membrana celular en el proceso.

Mucho antes de que pudieran fotografiarse mediante técnicas de alta resolución, se había ya planteado la idea de que los virus se empaquetaran empleando algún tipo de regla geométrica. En la parte inferior de la figura 3.4 vemos seis ejemplos de virus muy diversos, entre ellos el de la hepatitis B o el de la polio. Todos ellos son regulares y se generan dentro de la célula a

partir de una información genética mínima. Al estudiar el genoma de los virus, se pudo descubrir que eran muy pequeños y que poseían un número muy limitado de genes. Cada uno de estos genes sería el responsable de la síntesis de una proteína, y dado que cada virus requiere una cubierta cerrada que sirve de caja protectora para su material genético, sólo unas pocas proteínas (tal vez una o dos) podrían ser empleadas para este objetivo. En otras palabras, si cada gen del virus produce una pieza de la cubierta, y ésta estuviera formada por proteínas distintas, no sería posible codificar estos componentes en un genoma tan simple. Quedó claro desde el principio que la masa total del virus era muy superior a la de su genoma, y esta observación llevó a los geniales James Watson y Francis Crick a una conclusión inevitable: la cubierta de los virus debía ser el resultado de un empaquetamiento regular de unas pocas proteínas. El famoso dúo, que ya había logrado descodificar la estructura del ADN, planteaba una nueva conjetura: de algún modo, debía ser posible crear una cápsula perfectamente cerrada a partir de la unión de un conjunto de moléculas idénticas. ¿Cómo? La solución nos la da una de las ideas más elegantes y antiguas de la geometría: la existencia de los llamados «sólidos platónicos».

Estos cinco cuerpos eran conocidos y fueron bien estudiados en la Grecia antigua y sirven para desmontar la idea de los virus como diseños de un ingeniero. En la figura 3.5 vemos a los cinco miembros de esta familia, denominados también «sólidos perfectos», a los que se llega empleando como elementos de construcción triángulos equiláteros (con lados iguales), cuadrados o pentágonos idénticos. Estos sólidos son el tetraedro, obtenido uniendo los lados de cuatro triángulos; el cubo, uniendo seis cuadrados; el octaedro, creado mediante la combinación de ocho triángulos; el dodecaedro, que emplea doce pentágonos regulares, y finalmente el icosaedro, obtenido mediante el empleo de veinte triángulos. Éstos son los únicos poliedros regulares y su singularidad reside en que sólo estas piezas básicas pueden ser combinadas de forma que encierren un volumen. Combinando elementos simples y repetidos podemos crear estructuras altamente ordenadas. La predicción de Watson y Crick resultó totalmente acertada: los virus emplean en la gran mayoría de especies conocidas algún tipo de geometría icosaédrica.

Cuando fue posible reconocer la estructura de distintos virus (empleando técnicas de cristalografía y microscopio electrónico), se comprobó que muchos de ellos poseían la simetría esperada.

Podemos llevar a cabo este proceso recortando y pegando una plantilla adecuada, tal y como hacen los niños en la escuela. Pero en el interior de las células nadie recorta y pega, o al menos no como lo haría un diseñador. Lo que ocurre es fascinante y obedece las reglas de la física: una vez que se ha creado un número suficiente de copias de la proteína que servirá de base, éstas simplemente se ensamblan de forma espontánea. Lo que suele ocurrir es que grupos de proteínas se organizan en bloques básicos, los llamados capsómeros, que después se unen formando la denominada cápside (la envoltura externa) del virus. El sólido regular es la solución de mínima energía, de manera parecida a la de una perfecta pompa de jabón. El icosaedro no sólo no es un objeto diseñado: es la única posibilidad. Con los avances de la biología estructural pudo determinarse con precisión la organización de las cápsides y pudo comprobarse que el número de elementos repetidos seguía lo esperable de la pura geometría. Virus como los de la polio o la viruela seguían este esquema y, salvo excepciones, ésta parece ser la norma general. Aunque podemos objetar que algunos de los sólidos platónicos —los más pequeños— nunca han sido observados. No existen virus (al menos que sepamos) tan pequeños que puedan ser empaquetados en el interior de un tetraedro, aunque sabemos que es posible, empleando técnicas de nanotecnología, construirlos. Estas cajas contenedoras han sido creadas con el objetivo único de demostrar que su estructura es estable. Pero una situación muy distinta es que puedan ser sintetizadas a partir de un gen vírico. Muy posiblemente exista un límite fundamental al tamaño del genoma capaz de codificar las piezas de su contenedor y a la vez caber en éste.

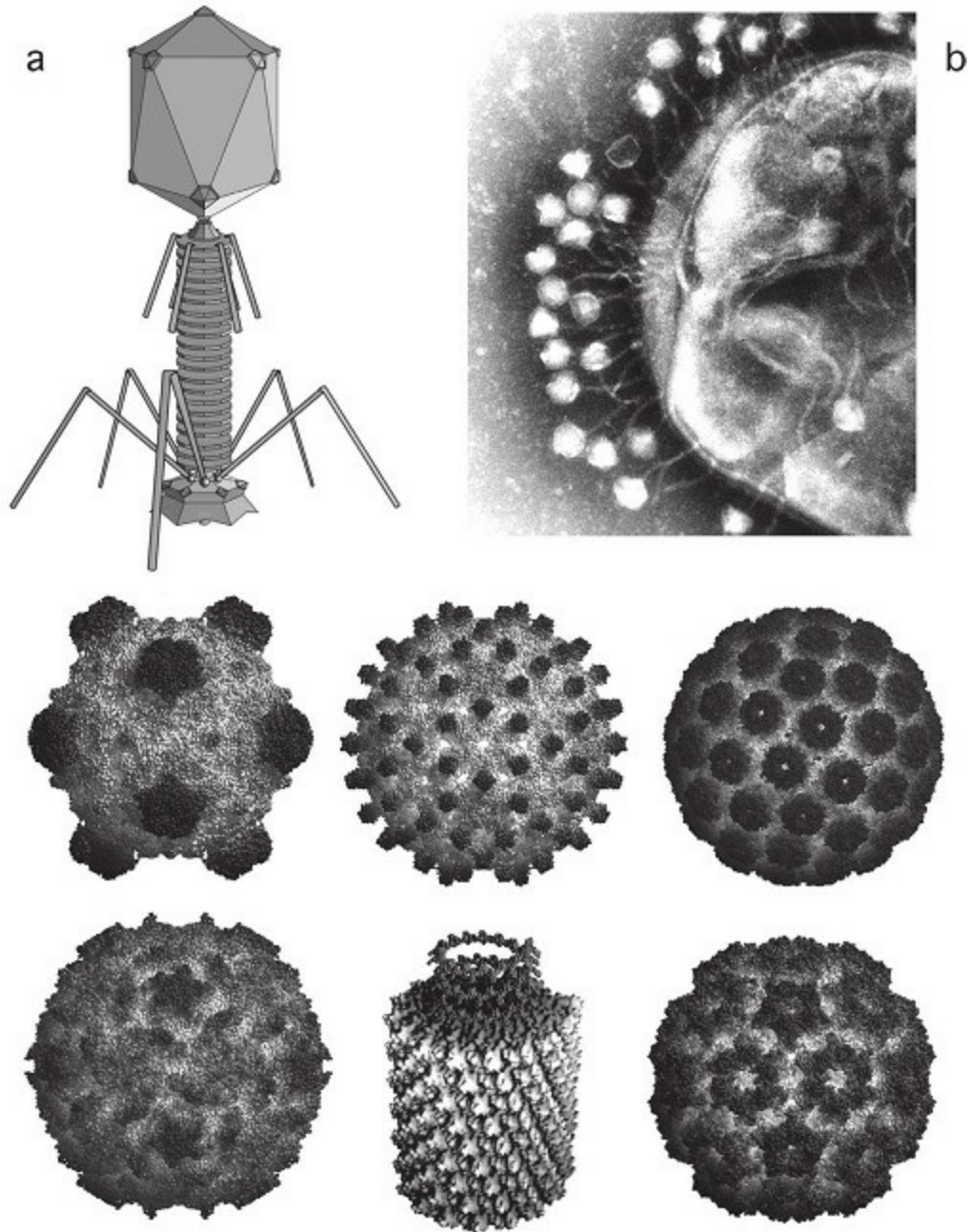
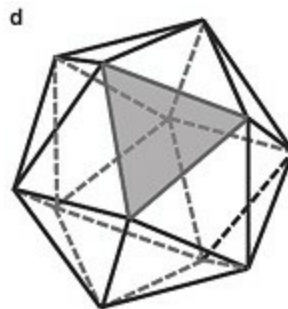
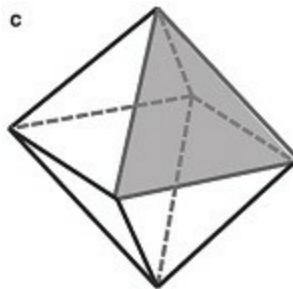
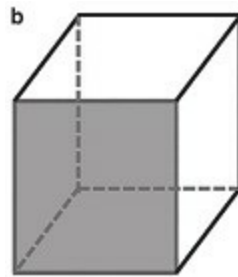
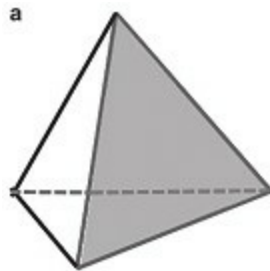


Figura 3.4. El universo regular de los virus. Algunos virus que infectan bacterias, como el bacteriófago T4 (a), lo hacen empleando un sistema de inyección que les permite perforar la pared de las bacterias, tal y como muestra la imagen (b) obtenida por microscopio electrónico. Muchos otros virus poseen una geometría muy notable (imágenes inferiores) resultante del ensamblaje de unas pocas moléculas.

Así que parece razonable esperar que las formas de vida parásitas más simples que puedan aparecer en otro lugar del cosmos compartan con nuestros virus algunos principios básicos de diseño. Copiarse con rapidez y

economía es un objetivo posible siempre y cuando se emplee el orden gratis que proporciona el autoensamblaje. Esta capacidad natural de generar estructuras altamente ordenadas a partir de interacciones entre moléculas iguales va más allá del caso particular de nuestro planeta o de su química. Para alterar esta regla general, necesitaríamos recurrir a otras formas de empaquetamiento o tal vez a tipos de proteínas que se comporten de forma distinta a las que conocemos.



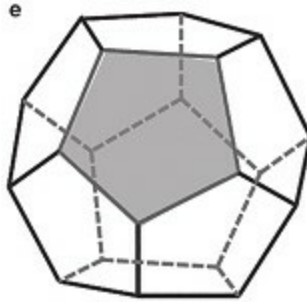


Figura 3.5. Los sólidos platónicos, definidos por objetos cerrados regulares cuyas caras son todas idénticas. Aquí vemos los cinco más simples: (a) el tetraedro, (b) el cubo, (c) el octaedro, (d) el icosaedro y (e) el dodecaedro.

Ver en la oscuridad

Algunos biólogos evolucionistas han señalado que una innovación clave en el desarrollo de la complejidad de nuestra biosfera fue la aparición de la visión. Para los seres humanos éste es el sentido que, con diferencia, domina sobre todos los demás. Los primeros depredadores que aparecieron hace 550 millones de años, así como sus presas, explotaron a fondo la capacidad de percibir los cambios de su entorno mediante sistemas de visión. El ojo humano en particular nos maravilla por su enorme precisión. Posee una estructura en la que hay una cámara, una capa de células que reciben la luz y detectan colores, una lente que canaliza la luz y otras muchas características que nos hacen pensar en una máquina muy bien diseñada. El mismo Charles Darwin reconoce en *El origen de las especies* el reto de comprender cómo surge esta complejidad:

Suponer que el ojo, con todos sus aparatos inimitables para ajustar el enfoque a distancias diferentes, al admitir diferentes cantidades de luz y para la corrección de aberraciones esféricas y cromáticas, pudiera haber sido formado por selección natural, parece, y lo confieso abiertamente, absurdo en el más alto grado.

Como en muchas otras ocasiones, Darwin hace un ejercicio de honestidad que podría entenderse como un contraargumento de su teoría. De hecho, los defensores de la explicación bíblica del origen de las especies (y de todo lo demás) han empleado las palabras de Darwin para argumentar que es imposible generar un órgano tan complejo como el ojo a través de un proceso de acumulación de cambios.

La razón me dice que si puede mostrarse que existen muchas gradaciones de un ojo simple e imperfecto a uno complejo y perfecto, y que cada grado resulta útil a su poseedor, como ciertamente es el caso; y si además, el ojo alguna vez varía y las variaciones son heredadas, como es de igual manera ciertamente el caso, y si tales variaciones deberán ser útiles a cualquier animal aunque cambien sus condiciones de vida, entonces la dificultad de creer que un ojo perfecto y complejo pudo ser formado por selección natural, aunque insuperable por nuestra imaginación, no deberá ser considerada una refutación de la teoría.

Es decir: si disponemos de suficiente tiempo, el ojo complejo puede ser inevitable. De hecho, aunque los detractores de la teoría de la evolución suelen criticarla señalando que raramente se encuentran «eslabones perdidos», las formas intermedias que separan un sistema de visión mínimo del ojo complejo existen en la naturaleza y nos permiten construir una historia bien definida de cómo se puede recorrer el camino desde unas pocas células que detectan luz hasta un sistema de detección, inversión y enfoque de las imágenes procedentes del mundo exterior. En la figura 3.6 se muestran seis ejemplos de estos ojos reales con distintos niveles de complejidad. Todos ellos separan a sus portadores de un mundo sin luz. Antes de su aparición, los seres vivos que habitaban el océano primitivo vivían literalmente en la oscuridad: aunque muchos podían captar la luz del Sol y emplearla como motor de su crecimiento y desarrollo, eran ciegos al mundo externo. Con la aparición del primer sistema de fotorrecepción, probablemente tan simple como una molécula capaz de reaccionar a la luz y provocar una respuesta (por ejemplo, acercarse o alejarse de la fuente de luz), surge la oportunidad de generar respuestas y comportamientos complejos. La solución (o soluciones) ha aparecido no una, sino muchas veces de forma independiente a lo largo de la evolución de grupos muy distintos, que incluyen insectos, medusas, crustáceos o vertebrados.

En el mundo primitivo en el que hace 550 millones de años se produce la llamada explosión cámbrica, la visión tuvo un papel posiblemente esencial en la aparición y diversificación de los primeros depredadores. Nada tan directo y efectivo como poder ver a tus presas. Nada tan efectivo también para hacer que éstas desarrollaran a su vez sistemas de visión que les permitieran detectar a sus posibles asesinos. Con la llegada de capas de células que pueden además plegarse formando concavidades que capten la luz y la concentren en una zona concreta, el ojo resultante empieza a evolucionar

hacia una cámara de fotografía. De hecho, los ejemplos que aparecen en la figura 3.6, así como otras formas intermedias, permiten definir una secuencia natural desde el receptor primitivo hasta el ojo moderno, proporcionando un camino predecible hacia la complejidad que había sorprendido a Darwin. En esta escalada de cambios aparecen, entre otros, el ojo de nautilus, que carece de lentes de enfoque y se corresponde a la perfección con la cámara oscura (figura 3.6, abajo), que no es una solución corriente pero sí muy efectiva. Los inventores humanos descubrieron esta solución siglos antes de saber que el nautilus la había hallado millones de años atrás: al dejar pasar la luz de la calle por un pequeño orificio y proyectarla sobre una pantalla dentro de una habitación oscura, vemos una imagen invertida de casas o personas. Pese a la simplicidad del mecanismo, podemos obtener una imagen nítida. Del mismo modo, el desarrollo de las primeras lentes que permitieron diseñar los instrumentos ópticos se produjo al principio mediante ensayo y error, y no se inspiraron en la observación de la naturaleza. Su «descubrimiento» en ambos casos fue completamente independiente. Los principios básicos hallados, los mismos.

En la mayoría de organismos multicelulares de cierto tamaño, el ojo complejo posee lentes internas que permiten crear una imagen precisa, y esta solución tan elegante parece repetirse una y otra vez en la evolución de grupos muy distintos, como si tan sólo existiera un diseño básico posible. Y probablemente sea así. La prueba más contundente es posiblemente el hallazgo de este diseño en un organismo constituido por... ¡una sola célula! Tal como suena: en algunas especies de algas unicelulares, se ha encontrado una estructura en su interior que es ni más ni menos que un ojo complejo con iris, cristalino y retina. Estos ojos han sido hallados en algunas especies de dinoflagelados, como es el caso de los géneros *Erythropsiidium* y *Nematodinium*, cuyos individuos —formados por una sola célula— poseen un *oceloide* de gran tamaño (figura 3.7). Al observarlo en el microscopio, resulta imposible no ver el parecido con nuestros ojos de vertebrado. Este oceloide presenta una clara estructura redondeada que actúa como lente (el hialosoma) y otra inconfundible también que presenta pigmentos y tiene forma de copa, igual que nuestras retinas.

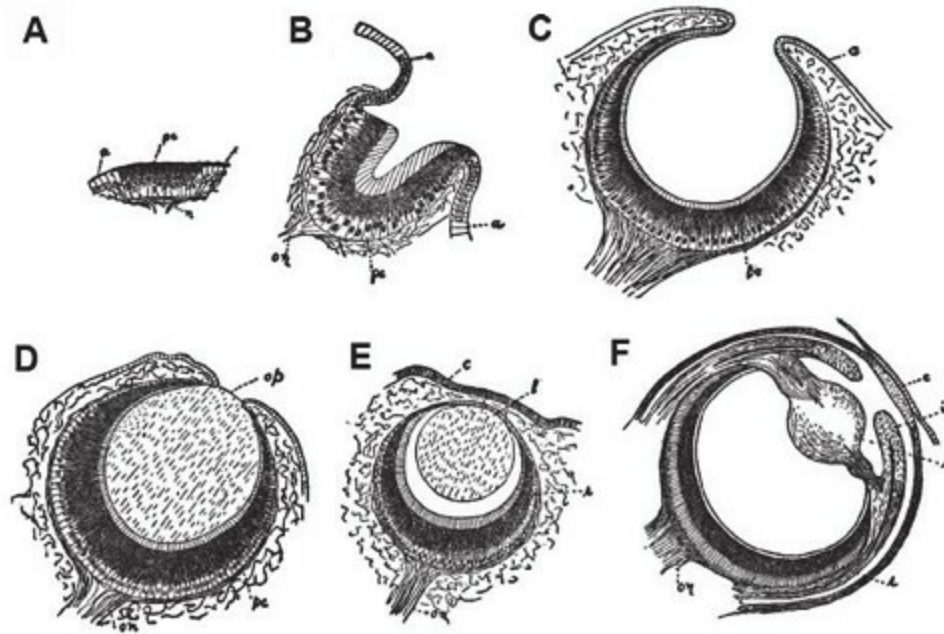


Figura 3.6. La evolución de los sistemas de visión ha dado lugar a diversas soluciones intermedias que incluyen (a) capas de células con pigmentos, (b) capas sensibles con cierta curvatura, (c) cámaras oscuras, en las que hay un orificio por el que entra la luz en una cavidad y (d-f) ojos complejos dotados de una lente en su interior. Esta última es la solución más común entre los animales, si bien el nautilus (imagen inferior) posee una cámara oscura.

Esta observación parece disparatada: ¿un ojo al completo dentro de una sola célula? ¿Cómo es posible? El grado de incredulidad queda bien establecido si tenemos en cuenta que los ocelotes fueron ya descritos en 1884, pero la perplejidad sobre su existencia hizo que las primeras explicaciones incluyeran la posibilidad de que las células hubieran incorporado (de algún modo) un ojo procedente de algún organismo multicelular. Karl Vogt, un zoólogo de la época, criticó duramente los primeros informes sobre esta especie: una sola célula no podía ser posible de ningún modo. Pero el ojo de estas células existe, y para empezar a responder a nuestras preguntas debemos recordar que la mayoría de células complejas de nuestro planeta contienen en su interior orgánulos que se emplean a menudo para capturar energía y procesarla. Las mitocondrias, en particular, son las responsables de proporcionar la energía requerida para impulsar los procesos celulares, y su origen debe encontrarse en la fusión de dos células, tal y como sugirió en los años ochenta la científica estadounidense Lynn Margulis. Estos orgánulos son en realidad los fósiles de un acontecimiento accidental en el que un microorganismo fue capturado por una célula de mayor tamaño que lo engulló, resultando en una simbiosis. Pero las relaciones simbióticas pueden ser muy complejas, y el oceloide es un caso especialmente notable.

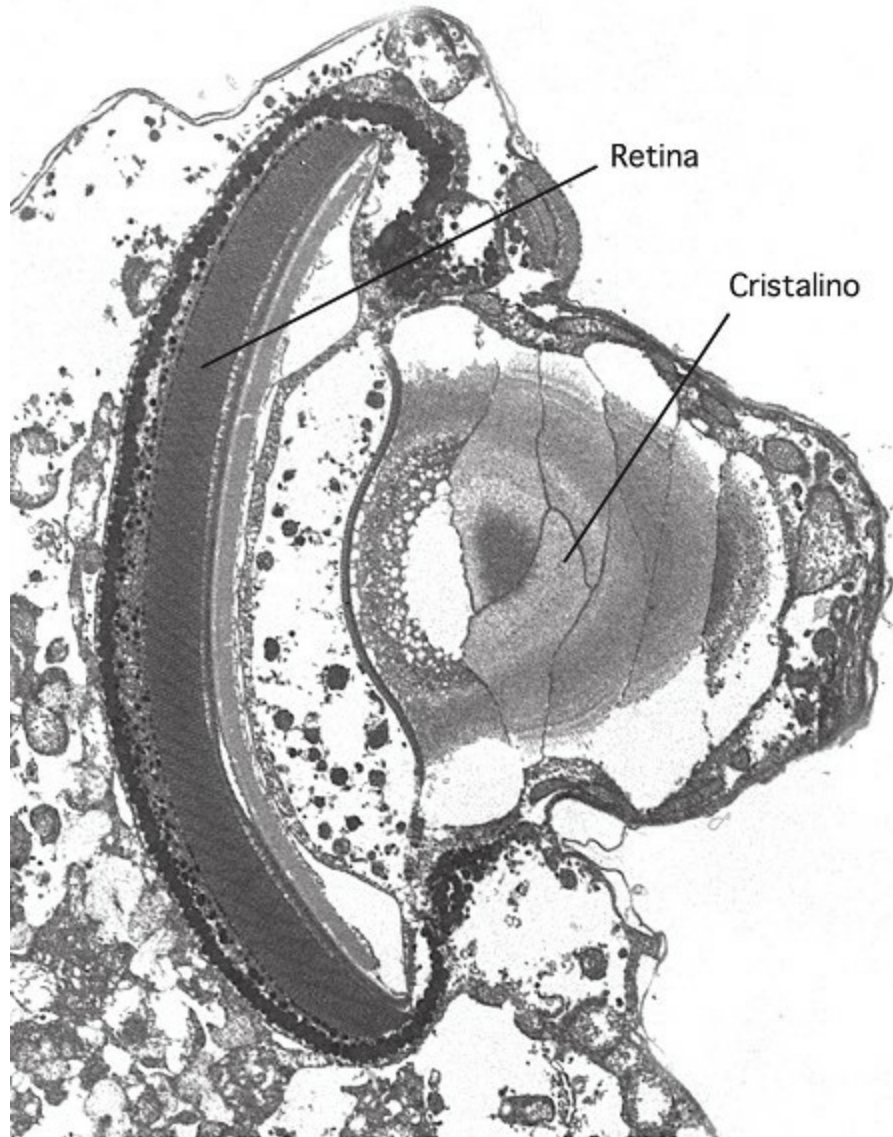


Figura 3.7. El ojo complejo también aparece en el interior de organismos unicelulares. Aquí se muestra una sección del oceloide de un alga unicelular, en el que indicamos dos de las estructuras (formadas por agrupaciones de endosimbiontes) características. (Imagen de Gregori Gavellis.)

El estudio de estas estructuras demuestra que son el resultado de la agregación de distintos tipos de microorganismos internalizados que han coevolucionado con la célula huésped, organizándose en el espacio en forma de ojo. Un ojo tan complejo como el nuestro, pero tan sorprendente que parece una historia de ficción. Pero podemos identificar con precisión la lente, una córnea, el iris y la retina, cada uno de ellos formado por diferentes grupos de distintos endosimbiontes. Las mitocondrias forman la capa que

actúa como córnea e iris. La retina está compuesta por cloroplastos que poseen proteínas capaces de detectar la luz. Cuando las células se dividen, sus diminutos ojos experimentan también un proceso de división.

El ojo complejo que obsesionaba a Darwin nos ofrece uno de los mejores ejemplos de convergencia de diseños. El diseño evolutivo que compartimos vertebrados o pulpos, y que nos ha dotado de estas cámaras de enorme precisión que ocupan las órbitas de nuestro cráneo, también ha surgido en sistemas unicelulares enormemente alejados de nosotros. Los procesos de desarrollo que dan lugar a unos y otros son enormemente distintos, por no hablar de sus orígenes. Podrían ser diseños muy distintos, pero no lo son: no importa en qué escala nos encontremos, de qué están hechos los distintos componentes ni cómo hemos llegado a ellos. El ojo es la solución óptima y general, y también es muy posible que si alguien mira al cielo estrellado desde otro mundo, tal vez deteniendo su mirada en esta estrella no muy brillante alrededor de la que seguimos dando vueltas, lo haga también con ojos no muy distintos de los nuestros.

Querido parásito

Hemos hablado más arriba de la estructura de los virus, que habitan en la zona indefinida entre lo vivo y lo no vivo. Nos hemos concentrado en aquellas propiedades de estas entidades que tienen que ver con su naturaleza casi química, que nos recuerda que de algún modo han perdido parte de lo que normalmente denominaríamos materia viviente. Su fama de parásitos y de patógenos, causantes de mil enfermedades y millones de defunciones, oculta sin embargo un elemento muy importante en relación con el papel que han desempeñado a lo largo de la evolución. Y tal vez sean tan necesarios en otros mundos como aquí, en el nuestro. Porque lo cierto es que todo parece indicar que la historia de toda la vida que ha surgido sobre la biosfera se halla inextricablemente unida a una batalla constante con los virus, pero también con un diálogo que tal vez sea igualmente importante. Analicemos nuestras pequeñas criaturas moleculares y algunos hechos acerca de su papel en la historia de nuestro planeta.

En primer lugar, ahora sabemos que los virus son, con diferencia, los elementos más abundantes de la biosfera. Son cien veces más abundantes que las bacterias, así que de algún modo cuestionan la afirmación de que el mundo está dominado por éstas. Su papel ecológico es ahora bien conocido y sabemos que controlan no sólo las poblaciones de organismos unicelulares en el océano, sino incluso los mismos flujos de energía y materia. Tal vez el aspecto más sorprendente es su papel esencial en el ciclo del carbono y, en consecuencia, en el clima global de la Tierra. Los virus son tan omnipresentes y tienen tal impacto en las cadenas tróficas marinas que no poseen rival en cuanto al control que ejercen sobre nuestro planeta. Se ha estimado que su número puede rondar las 10^{30} partículas en el océano (un uno seguido de 30 ceros) y que cada segundo se dan 10^{23} infecciones, que en un día acaban con la quinta parte de toda la vida microbiana del océano, con lo que se da un proceso de renovación veloz a medida que los virus y sus huéspedes mantienen su guerra particular. La escala de su impacto es simplemente descomunal.

Pero el aspecto que más nos interesa aquí es la constatación de que los virus no sólo han actuado como entidades capaces de propagar enfermedades. Precisamente por su enorme impacto y por la necesidad de responder a su presión, los virus han sido un motor esencial de la misma evolución. Es interesante en este sentido comparar el cambio evolutivo experimentado por la vida sobre nuestro planeta con la evolución de los virus informáticos, que surgen tan pronto como se da la oportunidad de copiar programas de forma automática (un virus en este caso no es más que un programa, igual que ocurre con los virus naturales). Con la creación del primer «gusano» informático, comienza también una carrera de armamentos en la que el diseñador humano tiene obviamente un papel central. Con todo, los pasos que se van dando históricamente nos recuerdan muchas de las transiciones que han ocurrido durante la evolución biológica. Por ejemplo, el desarrollo de sistemas de reconocimiento de estos programas parásitos es seguido por el de sistemas de cambio que imitan las mutaciones (aunque no tienen su misma naturaleza), con lo que deben aparecer otros programas capaces de detectar estos cambios a medida que se producen. Finalmente, de manera parecida a como algunos virus (como el VIH) se camuflan temporalmente dentro de su

huésped sin mostrar síntomas, los virus troyanos entran en nuestros ordenadores y los emplean sin dar señales de su presencia. Esta secuencia de cambios tan similar a su contrapartida biológica, pese a todas las diferencias, nos sugiere que los parásitos de la información (viva o no) se comportan y evolucionan de formas muy predecibles.

La aparentemente universal aparición de los parásitos es seguramente una de las pocas leyes generales de la complejidad, ya sea molecular, celular, artificial o social. En cualquier sistema capaz de cambiar y adaptarse, los sistemas parásitos parecen ser inevitables. En consecuencia, debemos suponer que, si los recursos lo permiten, los parásitos sean componentes clave de esta complejidad. Los experimentos de vida artificial llevados a cabo desde los años cincuenta confirman esta suposición. Si simulamos un sistema de vida artificial dentro del ordenador y dejamos que las reglas permitan cortar, pegar y mutar los programas o cadenas que representan a los organismos, tarde o temprano surgirán entidades parásitas. Y aunque los humanos no somos tan simples, nuestra capacidad para desarrollar —especialmente dentro de la economía y los sistemas de control político— comportamientos parásitos (o egoístas) es extraordinaria. En el mundo hiperconectado en el que la economía sin regulación puede explorar su espacio de posibilidades sin control, el sistema real sobre el que se sostiene la economía financiera ha creado un verdadero monstruo. Si definimos en general a un parásito como un organismo o sistema que explota los recursos de otro sin darle nada a cambio, parece claro que el sector financiero que se consolida en las últimas décadas del siglo xx se ajusta bien a la definición. Dado que únicamente gestiona recursos existentes sin crear nada, mientras su tamaño se multiplica varias veces, éste es probablemente el mayor sistema parásito de la historia humana. Y como ocurre con los parásitos que escapan al control y siguen expandiéndose, ponen en peligro la salud e incluso la misma existencia del sistema que los soporta.

Pese a todo lo malo que representa la existencia de formas de vida parásitas, podemos afirmar sin lugar a dudas que sin los virus no estaríamos aquí. Los virus impulsaron la emergencia de las primeras células y el desarrollo del sistema inmunitario, y son responsables en buena medida de garantizar la diversidad de los ecosistemas. Sin ellos, la vida habría quedado

restringida al dominio de lo más simple, como una tecnología de primera generación que se ha quedado limitada a las soluciones más simples, al no hallarse sometida a desafíos. Los virus impulsaron la evolución de lo complejo, y siguen haciéndolo. En este sentido, es interesante mencionar que, también en sistemas artificiales, se ha podido comprobar que la presencia de parásitos mejora la eficiencia de los algoritmos desarrollados para encontrar soluciones óptimas a un problema dado, tal y como demostró en 1991 el informático Daniel Hillis. Al estar obligados a coevolucionar con los parásitos, los programas que se desea optimizar se ven obligados a explorar (huyendo de sus virus) dominios del espacio de posibilidades que en otras condiciones no alcanzarían.

La coevolución es un proceso de importancia crucial y es responsable de dar forma al espacio de lo posible. En biología evolutiva existe la teoría, propuesta por el ecólogo Leigh Van Valen en 1973, de que muchos sistemas se encuentran en cambio permanente. Esta idea se apoya en diversas líneas de evidencia, y es probablemente una ley general de la evolución de la complejidad. En particular, cuando se estudia la duración de distintos grupos de organismos en el registro fósil, comprobamos que ninguna especie dura demasiado, sugiriendo que los participantes del teatro evolutivo no pasan demasiado tiempo en el escenario. De una forma similar a como Alicia corre de la mano de la Reina Roja en la figura 3.8, en *Alicia a través del espejo*, Van Valen sugirió que el ambiente externo de una especie incluye también a las demás especies con las que convive, y cuando una cambia, las demás deben cambiar también. En el cuento de Lewis Carroll, la Reina Roja y Alicia corren sin parar hasta que Alicia se da cuenta de que no se han movido del sitio:

—Pero ¿cómo? ¡Si parece que hemos estado bajo este árbol todo el tiempo! ¡Todo está igual que antes!

—¡Pues claro que sí! —convino la Reina—. Y, ¿cómo si no?

—Bueno, lo que es en mi país —aclaró Alicia, todavía jadeando—, cuando se corre tan rápido como lo hemos estado haciendo y durante algún tiempo, se suele llegar a alguna otra parte...

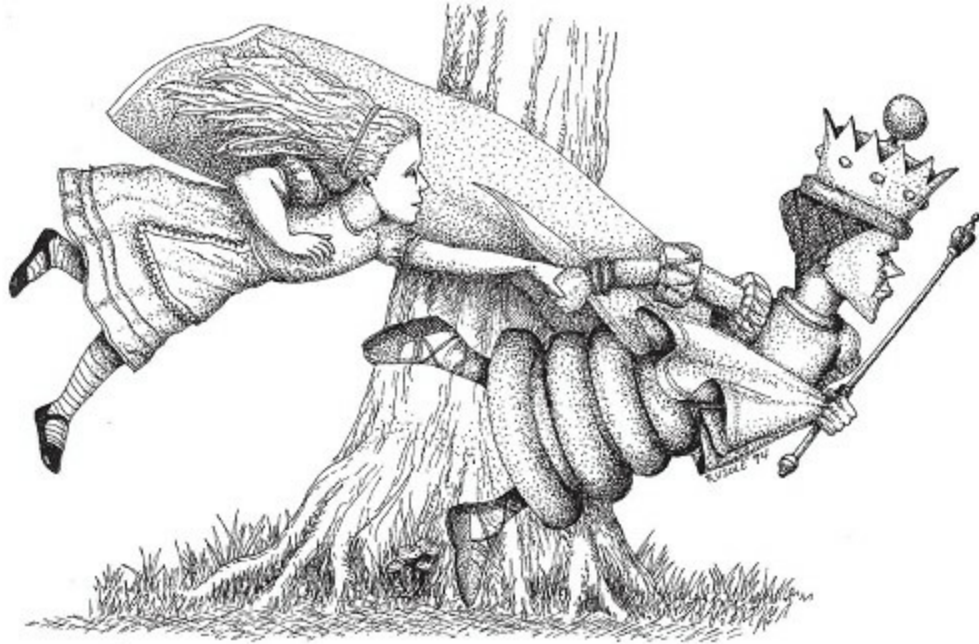


Figura 3.8. Alicia y la Reina Roja, en su carrera veloz hacia ninguna parte. En esta famosa escena que inspiró al biólogo evolutivo Leigh Van Valen, Alicia y la Reina Roja corren sin cesar pero no se mueven del lugar en el que están. Toda una metáfora de la coevolución entre especies, que también precisan del cambio para no extinguirse. (Dibujo de Ricard Solé.)

—¡Un país bastante lento! —replicó la Reina—. Lo que es aquí, como ves, hace falta correr todo cuanto una pueda para permanecer en el mismo sitio. Si se quiere llegar a otra parte hay que correr por lo menos dos veces más rápido.

Esta teoría sugiere que, al igual que ocurre en esta escena, las especies cambian debido a sus interacciones sin que ello signifique una mejora real de ninguno de los participantes. El huésped cambia para hacerse más difícil de detectar, pero su parásito cambia a su vez para superar las barreras de detección. Y así sucesivamente. Tal vez algún día seremos capaces de averiguar qué formas de vida habitan otros mundos. Muy posiblemente, también ellos habrán experimentado una carrera de armamentos que nunca se detiene contra todo tipo de organismos que ponen a prueba su misma existencia. Gracias a estos procesos de evolución compartida, también su biología se habrá enriquecido, aunque a menudo lo haya conseguido con el desarrollo de pandemias devastadoras. Tal vez también ellos hayan desarrollado estrategias para combatir a sus virus o quizá ya vivan en una

etapa de su evolución en la que su relación sea la de dos grupos que se necesitan entre sí. Sin duda todos seguiremos estando sometidos a los azares del reino de la Reina Roja, cambiando sin cesar para seguir jugando.

4

Mentes posibles

La planificación fue algo totalmente nuevo sobre el planeta, algo casi insólito. Existe únicamente en el cerebro humano. El futuro es un invento de la evolución.

Richard Dawkins

Por fin surgió una especie con una especialización —el cerebro— que paradójicamente ofrecía una puerta de escape a la especialización.

Loren Eiseley, *The Immense Journey*

Cada frase es un circuito eléctrico. Cuando accionas el interruptor, la frase se tiene que encender. Un circuito no tiene que ser bello, sino eficaz. Su belleza reside en su eficacia.

Juan José Millás, *El mundo*.

El experimento prohibido

En 1970 se estrenó la película de François Truffaut *El niño salvaje*, en la que se narra la emocionante historia del hallazgo de un niño que aparentemente había vivido durante años en el bosque, privado de todo contacto con otros humanos e incapaz de hablar. Cuando fue hallado en Aveyron, en el sur de Francia, el muchacho debía de tener unos doce años, y fue adoptado (y estudiado) por un joven médico, Jean Marc Itard, que le dio un nombre: Victor. Desde aquel encuentro, Itard compartió su vida con Victor e intentó que se integrara en la sociedad y, muy especialmente, que aprendiera a hablar. Esta historia tuvo lugar en 1800, una década después de la Revolución francesa. El encuentro permitió responder, al menos hasta cierto punto, a una cuestión muy polémica. La cuestión de si la capacidad de

aprender el lenguaje está limitada por el momento en el que el aprendizaje tiene lugar o si, por el contrario, puede ser adquirida en cualquier momento. En el primer caso, existirían limitaciones impuestas por la biología, mientras que en el segundo la educación, el ambiente en el que se desarrolla el sujeto, pueden siempre marcar la diferencia. El niño de Aveyron resolvió el dilema: nunca fue capaz de articular frases complejas y este hecho (y unos pocos referentes previos) llevó a conjeturar la existencia de un periodo crítico para aprender una lengua que, en caso de ser sobrepasado, impide su adquisición. ¿Era este niño un caso singular, del que no se deberían extraer conclusiones generales? Para responder a esta cuestión se debería llevar a cabo el llamado *experimento prohibido*: mantener a un grupo de niños privados de toda comunicación con otros humanos durante el tiempo suficiente para comprobar la existencia de un límite temporal. Obviamente este experimento no se ha llevado a cabo en ningún laboratorio, pero por desgracia, y como es bien sabido, los humanos somos capaces de lo mejor y también de lo peor.

El estreno de la película sobre Victor coincidió en el tiempo con la conmoción provocada en Estados Unidos por la noticia de una niña que había pasado casi catorce años completamente aislada en su hogar paterno y que resucitó de nuevo los fantasmas del experimento prohibido. La niña, que recibió el nombre de Genie, había pasado sus años de cautiverio en una habitación cerrada, sentada permanentemente en una silla especial para bebés y privada de contacto oral con sus padres y hermano. El padre lo había prohibido y aquella norma fue obedecida a rajatabla. Genie no sabía hablar y andaba con dificultad. Después de su liberación, se convirtió en un sujeto de investigación único que permitiría estudiar el problema del desarrollo del lenguaje (y las preguntas que persistían desde la época de Victor) mediante nuevas tecnologías y aproximaciones científicas. Uno de los objetivos principales de los que estuvieron a su lado era comprobar si un individuo privado de lenguaje durante la infancia podía lograr desarrollarlo de forma completa mediante el entrenamiento adecuado. El caso de Victor de l'Aveyron establecía un precedente que no se había podido volver a estudiar. En el momento en el que se descubrió a Genie, no sólo se daban las condiciones para un estudio científico serio. Existía (y aún hoy continúa) un debate de gran calado acerca de la naturaleza misma del lenguaje. A finales

de los cincuenta, el lingüista Noam Chomsky había establecido las bases de una teoría del lenguaje que intentaba explicar, entre otras cosas, la sorprendente facilidad con la que los niños adquieren el lenguaje con toda su estructura gramatical. Aunque es cierto que un niño requiere la exposición a adultos con los que aprender cierto vocabulario y el empleo de reglas básicas, el hecho inusitado es que hacia los dos años de edad la progresión se acelera de forma extraordinaria. La secuencia de eventos sería: balbuceo, palabras aisladas, pares de palabras y... el lenguaje complejo. No hay una fase de tres palabras: se da un «salto» hacia la sintaxis, podríamos decir que un salto de dos a infinito. De algún modo, el cerebro es capaz de extraer las reglas generales y súbitamente puede crear estructuras de complejidad ilimitada, a pesar de que el niño o la niña se exponen durante sus dos primeros años a una pequeña muestra de palabras y frases.

Podemos representar esta complejidad explosiva en la figura 4.1, en la que indicamos de forma idealizada el rápido crecimiento en la diversidad de objetos resultante de la capacidad de combinación de nuestro cerebro. De hecho, si quisiéramos de verdad representar este potencial, las esferas del fondo deberían ser descomunales. A partir de unas reglas de composición simples, los fonemas pueden combinarse en sílabas, éstas en palabras y, gracias a la sintaxis, las palabras pueden formar oraciones de un poder expresivo ilimitado. Sin una inmersión en el mundo rico y complejo de las palabras que debería haber recibido de su familia y amigos, Genie confirmó una vez más la necesidad de desarrollar el lenguaje dentro de un periodo en el que el cerebro está preparado para ello. Sus progresos fueron siempre lentos, y en muchos casos, limitados. Por ejemplo, los niños aprenden con facilidad a formular frases en forma negativa o a generar preguntas. Genie tardó años en hacer lo primero (en forma primitiva) y, privada de la sintaxis necesaria, nunca supo expresar correctamente sus preguntas.

Los lentos progresos se vieron además dañados por los conflictos que surgieron entre los investigadores y el personal de servicios sociales, que percibía la constante intromisión de los científicos como un abuso. La niña fue llevada de nuevo con su madre y después pasó a vivir temporalmente con familias de acogida en las que no encajó en absoluto y donde fue —de nuevo— víctima de malos tratos. Su pequeña apertura al mundo nunca se desarrolló

por completo y hoy vive en una residencia para personas con discapacidad en algún lugar de California. Aunque sus progresos fueran a menudo pobres, hay que señalar que, más allá del problema del lenguaje, Genie fue capaz de desarrollar otras capacidades cognitivas y que —para bien o para mal— tenía un recuerdo claro de su vida antes de empezar a comunicarse. Cuando alguien le preguntó en una ocasión sobre su padre, contestó: «Papá pegó Genie palo grande». Un triste resumen de su vida fuera del mundo.

El lenguaje nos ofrece un ejemplo particularmente interesante del problema de lo posible y lo imposible, dado que se trata de una de las innovaciones más fundamentales para nuestra historia evolutiva como especie. Para algunos biólogos evolutivos, éste es el problema más difícil que tenemos que resolver. Sus orígenes son aún inciertos pero vamos avanzando a medida que aprendemos más acerca de sus bases biológicas y del estudio de los lenguajes existentes en la actualidad. Entre las cosas que hemos podido aprender, sabemos por ejemplo que no existen lenguajes humanos «simples» o, como se han denominado a menudo, «protolenguajes». Antes de que la antropología fuera una disciplina establecida, se suponía que la complejidad de una lengua podría estar directamente relacionada con el nivel de complejidad de la sociedad que la empleara. Siguiendo esta lógica, esperaríamos en un extremo del espectro lenguas complejas y ricas en sociedades urbanas y, en el otro extremo, lenguas simples con una gramática más rudimentaria, empleadas por los individuos de tribus aisladas. Por mucho que esta idea pueda parecer razonable, es completamente falsa: no hay lenguas «simples». Todas y cada una de las formas de lenguaje existentes en la actualidad muestran esencialmente el mismo nivel de riqueza, con una sintaxis compleja, una expresividad elevada y una capacidad virtualmente infinita de generar frases, pequeñas historias o novelas inmensas.

la diversidad cultural de la humanidad. Ambas comparten también un futuro difícil: las especies y las lenguas experimentan un declive preocupante que la globalización no ha hecho más que acelerar. Esta enorme diversidad nos ofrece una vez más la oportunidad de explorar la cuestión de lo posible y lo imposible. ¿Existen reglas generales de organización del lenguaje, válidas para todos ellos? Si ése fuera el caso, incluso un sistema de comunicación extraterrestre compartiría leyes en común con el nuestro.

Dónde acaba Babel

A pesar de su diversidad, todos los lenguajes comparten leyes comunes de organización, cuyo origen hay que buscar más allá de la biología. Por una parte, la diversidad se estructura alrededor de unas reglas generales asociadas a la presencia de la sintaxis, que formarían parte del hardware cerebral. La capacidad de aprender una lengua sería innata y debida a la presencia de una Gramática Universal (GU), una noción introducida por el lingüista Noam Chomsky en 1957, y que define el conjunto de reglas subyacentes para generar frases con la correcta jerarquía, organización y coherencia. En este marco teórico, el desarrollo del lenguaje queda determinado por los principios asociados a la GU, que se encontraría predefinida (de una forma que aún se desconoce) en el cerebro, canalizando el aprendizaje de las lenguas a las que se expone un individuo en sus primeros años de vida. Su presencia ha sido un tema de debate durante décadas. ¿Podrían existir otras gramáticas?

A principios de los años noventa, se llevó a cabo un experimento muy revelador al respecto. Christopher, o simplemente C, dotado de una capacidad única de aprender con gran rapidez un nuevo lenguaje, es un ejemplo excepcional de lo que se conoce como «Síndrome del Savant». Con un cerebro dañado por un parto difícil, C demostró desde los tres años una pasión inusitada por la lectura y el aprendizaje de lenguas extranjeras. Aunque con cierto nivel de autismo, problemas para orientarse, cruzar la calle o cualquier otra cosa de naturaleza práctica, C era capaz de asimilar sin esfuerzo la estructura de diferentes lenguajes y aprendió polaco siendo un niño, simplemente oyendo conversar al marido de su hermana, que hablaba

aquella lengua. Cuando le preguntaron cómo lo había conseguido, respondió: «Simplemente lo hice». A lo largo de los años terminó por aprender más de quince lenguas de forma rápida y fluida, y algunas más de forma incompleta. Lo más interesante del caso es que, como ocurre con los que aprenden su lengua materna, C es capaz de extraer las reglas generales de cada lengua e inferir sus peculiaridades aunque difieran entre sí de forma muy considerable. Nuestro sujeto ofrecía una posibilidad única de hacer un experimento real sobre la existencia de la gramática universal, que los investigadores Neil Smith y Ianthi-Maria Tsimpli llevaron a la práctica siguiendo una sugerencia del mismo Chomsky. Lo que hicieron fue presentar a C dos lenguajes nuevos. Uno era el bereber, una lengua afroasiática que se habla en el norte de África, y el otro, que llamaron Epun, poseía una estructura que violaba las reglas de la GU. Christopher aprendió el primero con rapidez y sin dificultades, extrayendo las reglas generativas de forma natural. El segundo, aunque poseía componentes de regularidad familiares, tenía también construcciones lingüísticamente «imposibles». Un individuo adulto podría terminar detectando las complejas y extrañas reglas, pero la mente de C operaba como la de un niño que adquiere la lengua, lo que ofrecía una ventana única al proceso de adquisición natural. Al principio se expuso a C a formas más o menos regulares (para hacer fácil el comienzo) y después a frases con estructura artificial. Por mucho que se esforzara, C fue incapaz de aprender aquel lenguaje que, aunque poseía reglas de ensamblaje bien definidas, no podía ser «adoptado». Sin las reglas universales que permiten la construcción de lenguajes naturales, el cerebro es incapaz de adquirir aquello que forma parte del dominio de lo imposible.

Una propiedad adicional tiene que ver con la presencia de una característica que, a primera vista, no parece nada deseable: la ambigüedad. En nuestro lenguaje habitual y en el de cualquier idioma del mundo, se da una combinación de precisión y ambigüedad que parece no encajar con un diseño óptimo. Si pensamos en la comunicación como un sistema capaz de transferir información de manera fiable, parece obvio (o al menos lo sería para un ingeniero) que un requisito esencial es eliminar cualquier tipo de componente que introduzca confusión o errores. Así, podríamos concluir con facilidad que no es apropiado que una palabra posea varios significados

alternativos o por el contrario que varias palabras puedan estar asociadas al mismo concepto. Este criterio se emplea en el desarrollo de lenguajes artificiales o en el desarrollo de sistemas de comunicación con robots (figura 4.2).

Pero esto no es lo que ocurre en los lenguajes naturales: ¿por qué? Supongamos que hacemos el siguiente experimento a partir de un texto escrito. Tomemos por ejemplo un capítulo del *Cuento de Navidad de Auggie Wren*, de Paul Auster, y a partir de sus frases crearemos una red de palabras, que obtenemos conectando una palabra con otra si, al menos en una frase del texto, han aparecido de forma consecutiva (figura 4.3a-b). Esta red permite obtener una visión global del lenguaje que define una cartografía de las interacciones entre palabras más que interesante. En la figura 4.3c vemos el resultado de este experimento. El capítulo de Auster se ha transformado en un mapa parecido al de Internet, en el que apreciamos con claridad que unas pocas palabras aparecen enormemente conectadas mientras que la mayoría lo están tan sólo con una o dos (figuras 4.3d-e). Este diagrama de interconexión es una consecuencia de que las palabras más frecuentes de un lenguaje se conectan también con más frecuencia con las demás. Como podemos apreciar, se trata en general de preposiciones, conjunciones o artículos cuyo contenido semántico es bajo o nulo y que hacen el papel de conectores entre otras palabras. Nuestra investigación demostró que de hecho esta red es un *mundo pequeño*, en el que, incluso cuando hemos añadido decenas de miles de palabras, tan sólo unos pocos saltos de palabra en palabra son precisos para conectar cualquier par de ellas. Y lo mismo ocurre con otras redes de lenguaje, como las que podríamos construir empleando conexiones semánticas. Por ejemplo, si partimos de la palabra «perro», es muy posible que nos venga a la cabeza «gato» y después «mascota» y después «amistad» y después «compañía» y así sucesivamente. Pero la secuencia podría ser «gato → bigotes → mostacho → Groucho Marx» y otras muchas alternativas. La cuestión es que si seguimos todos estos diversos caminos podemos trazar, una vez más, una red de palabras unidas entre sí. En esta red, tenemos también palabras ambiguas, a partir de las cuales podríamos conectarnos con muchos tipos de significados. Y es aquí donde su importancia (y su presencia universal) se hacen evidentes.

Para navegar en el espacio de palabras y hacer asociaciones, es muy deseable que sea fácil desplazarse mentalmente con agilidad. La red semántica es un mundo pequeño que, gracias a la presencia de palabras altamente conectadas, permite que este tráfico sea extremadamente rápido. ¿Cuáles son estos elementos hiperconectados? Las palabras ambiguas. La ambigüedad, lejos de ser una carga, representa la clave de un lenguaje óptimo y flexible. Y esta propiedad es seguramente universal. En otros estudios basados en la teoría matemática de la información, propusimos que la ambigüedad sería una consecuencia natural de minimizar el esfuerzo de comunicación entre hablantes. La idea de fondo es simple. Para lograr que el que habla haga el mínimo esfuerzo al emplear palabras para referirse al mundo externo y que sean comprendidas por su interlocutor, el hablante podría emplear muy pocos términos para referirse a cualquier cosa. Podríamos, por ejemplo, emplear la palabra «mesa» para referirnos a cualquier objeto de madera. Esta ambigüedad sin embargo es un problema para el que escucha, dado que se confundirá con facilidad y no sabrá a qué se refiere el hablante. Por el contrario, para que el que recibe las palabras haga el mínimo esfuerzo lo ideal sería que el hablante emplee una palabra para cada significado. Esta posibilidad implica el máximo esfuerzo del emisor de información, que debe poseer un léxico enorme y preciso. De modo que en ambos casos uno de los dos sale perdiendo. Dado que la comunicación es cosa de dos y que sólo tendrá éxito si ambos sacan partido de ésta, es preciso llegar a un compromiso. Cuando procuramos que ambos reduzcan a la vez sus esfuerzos, alcanzamos una posición intermedia en la que se combinan precisión y flexibilidad. La ambigüedad desempeña un papel central e imprescindible, y su carácter universal no refleja otra cosa que su inevitabilidad. Los lenguajes posibles surgidos de la evolución deben ser necesariamente ambiguos.



Figura 4.2. Una ventana a los orígenes del lenguaje nos la ofrece el empleo de robots que desarrollan formas de comunicación mediante aprendizaje y evolución. En la imagen, vemos a dos de estos robots del laboratorio de neurocibernética de Osnabrück (en el norte de Alemania) en compañía del investigador Luc Steels, pionero en la evolución del lenguaje en robots, actualmente en el Instituto de Biología de Barcelona. (Imagen cortesía de Luc Steels.)

Los límites de la inteligencia

El lenguaje es la faceta más evidente de nuestra mente simbólica, y ésta es el elemento clave de nuestra inteligencia. Pero la inteligencia es un concepto tan relevante como mal definido en biología, medicina o psicología. Recurrimos a este término para referirnos a la propiedad de poseer altas capacidades cognitivas. Una persona inteligente es alguien que posee un talento especial para resolver problemas o verlos desde ángulos poco comunes. Existen intentos de medir la inteligencia basados en el empleo de cuestionarios o pruebas minuciosas que pretenden cuantificar las habilidades de cada individuo frente a problemas de razonamiento o asociación. Pero también es utilizada como una etiqueta para referirse a dispositivos simples que responden de forma simple a condiciones simples. Por ejemplo, la expresión «casa inteligente» hace referencia a una serie de sensores y

sistemas de activación de luz o temperatura que, para ciertos umbrales, encienden luces o calientan agua de forma totalmente predecible. Pero el comportamiento en sí es muy simple y, si somos honestos, poco inteligente.

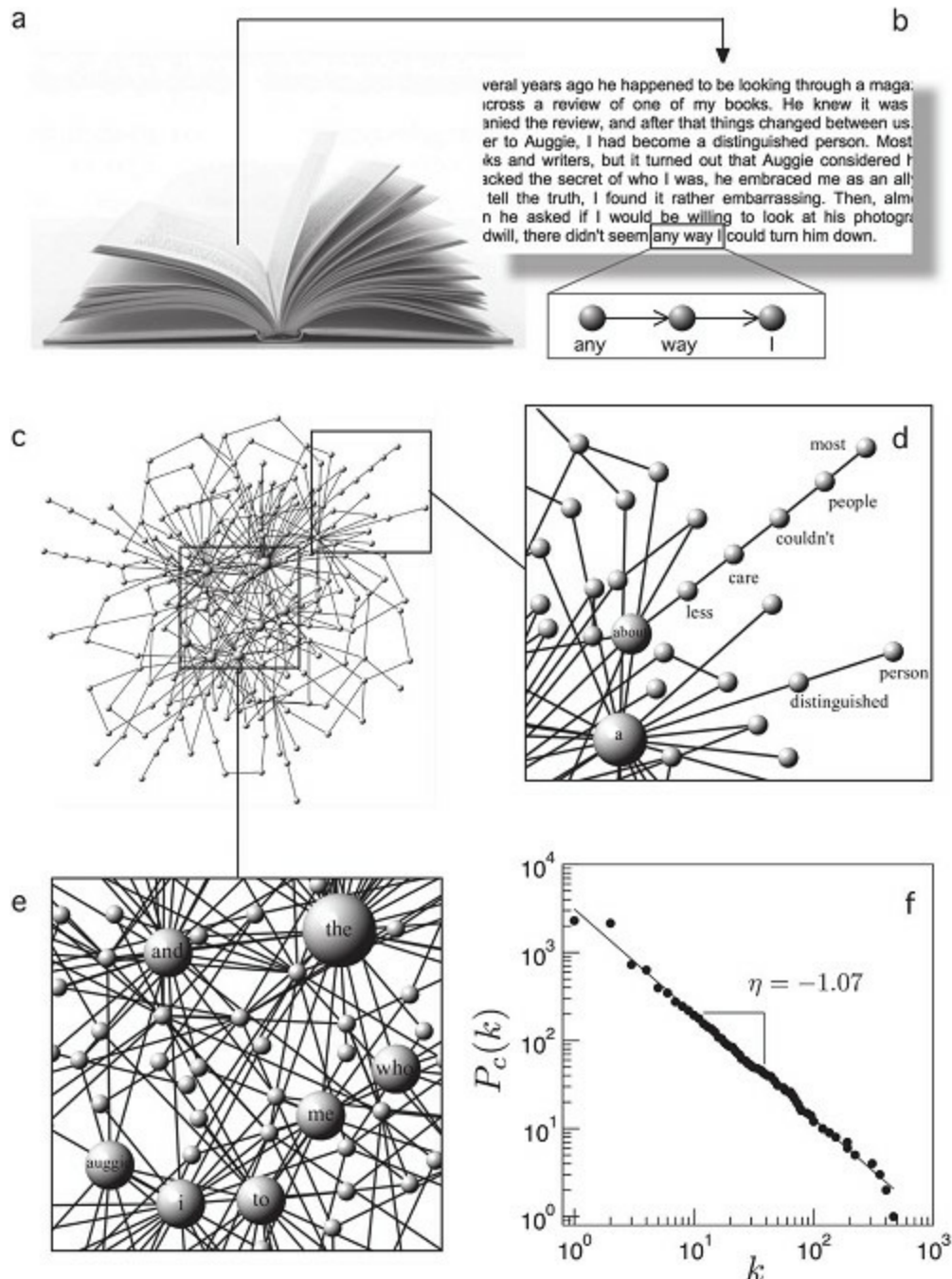


Figura 4.3. Cómo construir una red de lenguaje empleando textos escritos (a-b) en los que conectamos pares de palabras si aparecen contiguas al menos en una frase (b). En este ejemplo, vemos que «any» se conecta con «way», que a su vez se conecta con «I». La red resultante (c) para un texto corto posee

cadenas de palabras procedentes de frases (d) así como elementos hiperconectados (*and, the, I, to*) en los que se han cruzado multitud de frases.

Se considera que la aparición de los llamados «agentes neurales» es una de las grandes transiciones de la evolución, en la que surgen sistemas celulares de detección y almacenamiento de señales procedentes del ambiente externo. La aparición de sistemas que pudieran mantener una memoria de las acciones y estímulos pasados fue una verdadera revolución. Por primera vez, un organismo vivo podía mantener una relación activa con el pasado y el futuro, en lugar de ser meramente arrastrado por los acontecimientos presentes. Estos mecanismos de percepción y respuesta dieron paso a redes neuronales y sistemas de comunicación cada vez más sofisticados, lo que creó las bases para la aparición de diversas formas de inteligencia, que han evolucionado una y otra vez de forma independiente en grupos muy diversos. Se ha desarrollado en nuestros parientes cercanos, los primates, así como en cetáceos o elefantes. Aunque, si somos algo más generosos, la inteligencia está también presente en algunas poblaciones de microorganismos que forman colonias de formas complejas y altos niveles de organización, así como en las sociedades de insectos. Pero su alcance es muy inferior al de aquellos organismos que han sido capaces de desarrollar sistemas de percepción y procesamiento de información estables.

Tomemos el caso de las plantas: ¿han desarrollado algún tipo de inteligencia? En los años setenta se puso de moda la idea de que las plantas crecían mejor con ciertos tipos de música clásica o que podían detectar los sentimientos o pensamientos de sus propietarios. Estas majaderías han persistido hasta nuestros días y forman parte de una subcultura que cuenta con ceremonias en las que se abraza a los árboles y se habla con las semillas. Por supuesto que nada de eso es cierto, tal y como confirmaron diversos estudios serios en los que pudo demostrarse la sordera de las plantas a la música de Mozart y una indiferencia similar por los pensamientos humanos. Pero hay una pregunta legítima que sí podemos considerar: ¿por qué no hay plantas que muestren una complejidad cognitiva comparable a la de los animales? Algunos científicos han señalado que las plantas muestran respuestas que implican cierto grado de percepción, respuestas a estímulos

externos e incluso formas simples de aprendizaje. Pero todos estos atributos son los que podemos encontrar en colonias de bacterias y en consecuencia no dejan de ser expresiones de un tipo muy básico de inteligencia.

De nuevo la ciencia ficción nos proporciona inspiración para expandir nuestro repertorio de posibilidades. Veamos algunos ejemplos. En algunas historias, como *La tienda de los horrores*, una planta carnívora muy espabilada se zampa a los clientes molestos, y en el filme *La invasión de los ultracuerpos* nos encontramos con unas plantas capaces de imitar y replicar el cuerpo de sus víctimas humanas, generando una copia que conserva algo de la personalidad y los recuerdos de aquéllas, pero que ha perdido la libertad y autonomía del individuo original. En la naturaleza, lo más parecido a este último escenario nos lo da un reciente hallazgo: una planta trepadora cuyas hojas adoptan formas similares a las de los distintos árboles que emplea como soporte.

Quizá las claves de por qué vivimos en un mundo sin plantas pensantes nos las proporcione una última comparación con el mundo de la ficción. En *El día de los trífidos* —la novela del británico John Wyndham del año 1951—, el paso de un cometa deja ciega a la mayoría de la humanidad, que vaga sin rumbo por calles y parques. En este mundo de ficción, la humanidad hace décadas que explota un tipo de plantas (los trífidos) capaces de producir una picadura mortal, y que escapan de sus granjas para apoderarse del mundo. Los trífidos resultan ser capaces de comunicarse entre sí y también de captar sonidos y movimientos de su entorno, con lo que pueden tomar decisiones inteligentes, como hacia dónde desplazarse para cazar a sus presas.

Y aquí encontramos una diferencia esencial respecto de las plantas que conocemos: los trífidos pueden andar. Parece una diferencia menor, pero posiblemente ésta sea la clave de la pregunta que nos hacíamos al principio. Las especies se adaptan para explotar los recursos a su alcance y adoptan estrategias que les permiten ser eficientes. Las plantas se han adaptado de forma extraordinaria a ambientes muy diversos, y su invasión de la tierra firme estableció las condiciones para crear nuevos nichos a otras especies que vendrían después. El establecimiento de las primeras plantas dio paso a una erosión acelerada de los suelos rocosos y a la creación de suelos ricos en nutrientes en los que se establecieron multitud de organismos y aparecieron

variados mecanismos de simbiosis. Las plantas modificaron los ciclos del agua y del carbono, reduciendo el flujo de sedimentos y estabilizando el paisaje. Con estos cambios también surgieron nuevas formas de colonizar el espacio en dos direcciones: hacia arriba, creando los primeros bosques verticales, y hacia abajo, desarrollando sistemas de raíces de una complejidad que no podemos ver a simple vista pero que es igual a la de nuestro mundo aéreo. Y con estos pasos se dieron otras invenciones no menos importantes: se crearon diversos mecanismos de propagación y las semillas fueron la clave del éxito absoluto. Si la selección natural favorece a los que son más aptos para reproducirse, estos pasos eran los correctos, y los millones de años posteriores han cimentado los logros iniciales hasta hoy.

¿Por qué no hay plantas como los trífidos?; ¿por qué no tienen las plantas mecanismos de visión o movimiento? Con toda seguridad, porque nunca fueron necesarios como parte de la estrategia ganadora. Un organismo inmovilizado en un lugar concreto pero capaz de dispersar a su descendencia de forma segura no necesita mucho más para garantizar la supervivencia. Y porque, aunque podamos imaginar plantas con ojos o capacidad de mover sus ramas, deberíamos plantearnos por qué iba a surgir una propiedad así, con todo su coste asociado. Una especie capaz de desplazarse puede necesitar huir de sus depredadores. En lugar de ello, las plantas han dispuesto estrategias compatibles con su vida sedentaria, como desarrollar agentes tóxicos u hojas punzantes. En el espacio de las inteligencias posibles, las plantas ocupan un lugar especial y separado del resto.

¿Y qué hay de nuestro cerebro y sus límites? Este órgano maravilloso, y al que Woody Allen llama «su segundo órgano preferido», combina una historia evolutiva accidentada con algunos ejemplos extraordinarios de optimización. Por una parte, sabemos que la arquitectura de los microcircuitos que se empaquetan en nuestro córtex posee propiedades muy similares a las soluciones de compresión que han encontrado, de forma totalmente independiente, los ingenieros que diseñan circuitos integrados, particularmente en relación con sistemas de visión artificial. Por otra parte, la evolución del cerebro experimentó una aceleración brutal que podemos ver representada en la figura 4.4a, en la que observamos un crecimiento paulatino a lo largo de varios millones de años y un punto de inflexión radical que se da

alrededor de la aparición de *Homo habilis*. Posteriormente, el tamaño del cerebro y la expansión del córtex cerebral, especialmente el frontal, dominan la escena. Dentro de esta expansión explosiva se enmarcan diversos episodios de cambio relacionados con el uso de herramientas, el desarrollo del lenguaje, el dominio del fuego y la emergencia de la mente simbólica.

Volveremos a ello más adelante, pero nos podemos preguntar ahora si esta tendencia continuará. Regresando a la ciencia ficción, uno de los iconos que representan a los alienígenas «avanzados» suele ser un individuo habitualmente humanoide y con un cabezón descomunal. Un ejemplo clásico son los marcianos descontrolados de *Mars Attacks!*, cuya cabeza muestra directamente el cerebro grande como una pelota de fútbol y protegido por una especie de pecera. Otro bien conocido son los aparentemente amistosos extraterrestres del episodio titulado «Servir al hombre», emitido en la inolvidable serie *La dimensión desconocida*. En él, los visitantes del espacio vienen a nuestro planeta equipados con una tecnología extraordinaria que han desarrollado gracias a su inteligencia (y cerebro) excepcionales. Sus cabezas son también enormes pero su intención de «Servir al hombre», tal y como se titula su manual de buenas prácticas, resulta tener un sentido final algo distinto del que imaginan sus huéspedes terrestres.

El tema del tamaño del cerebro ha recibido mucha atención por parte de biólogos evolutivos, ingenieros y neurocientíficos. Cabe resaltar que el tamaño en sí no parece tener demasiada importancia en cuanto a su impacto sobre la inteligencia, sin importar lo grande que sea el cerebro. Grandes científicos, escritores o filósofos han producido sus mejores obras dotados de cerebros grandes o pequeños. Lo que parece realmente relevante es de qué manera se organizan las conexiones, no la cantidad de éstas. En cualquier caso, la cuestión de si estamos o no en los límites es más que razonable, y la respuesta parece clara: nuestro cerebro se halla con gran probabilidad en los límites de lo posible. Diversos autores han estudiado este problema desde una perspectiva que une la física y las restricciones metabólicas. ¿Qué han descubierto? No hay que olvidar que nuestro cerebro ya consume casi un 25 por ciento de la energía que empleamos, sin que nos salga humo de la cabeza. Si calculamos las necesidades de energía requeridas para incrementar el tamaño del cerebro, mejorar su interconexión, aumentar la velocidad de

propagación de las señales o empaquetar mejor las neuronas, nos enfrentamos otra vez a las restricciones de diseño. Si incrementamos el número de neuronas, el coste en energía crece enormemente y la necesidad de cables (los *axones* de las neuronas) que cubran distancias mayores hace que el sistema se haga más lento. Los cables extra que podrían conectar mejor diversas partes también consumen energía, y no hay que olvidar que ésta es de hecho la parte más costosa para nuestro metabolismo. La posibilidad de incrementar la velocidad tiene una solución bien conocida desde el punto de vista teórico: hacer que los axones sean más gruesos, lo que limita las pérdidas y mejora la propagación de señales. Pero las matemáticas también nos dicen que el coste de esta mejora en cuanto a energía se dispara con rapidez.

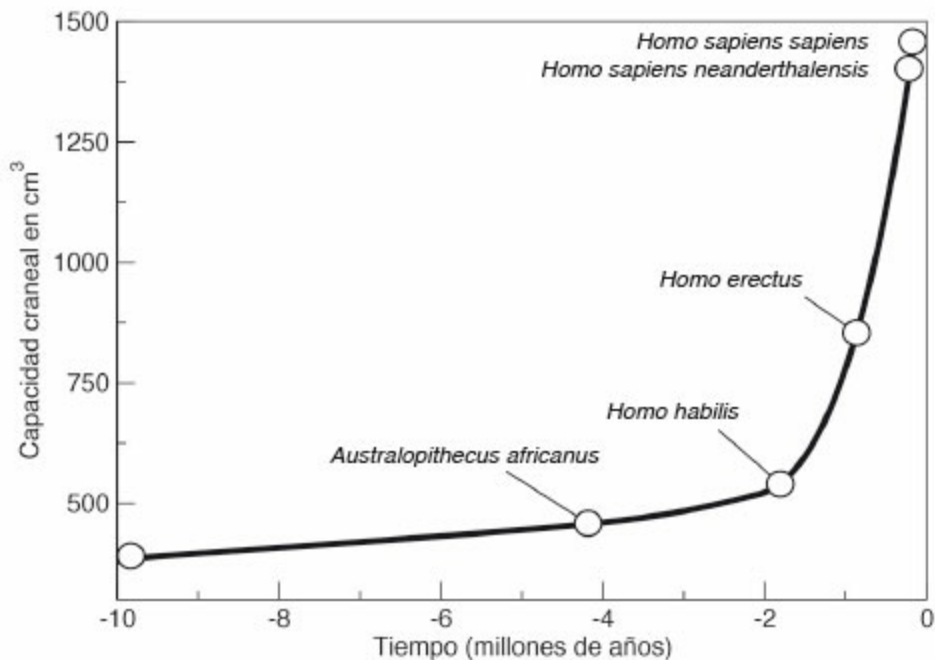


Figura 4.4. El desarrollo del tamaño del cerebro en la evolución de los homínidos presenta una clara aceleración hace unos dos millones de años, tras la llegada de *Homo habilis*.

Nos queda una última posibilidad, que es hacer que neuronas y sus conexiones sean de menor tamaño. Aunque empaquetar componentes es una de las tareas más habituales de los diseñadores de circuitos, también es un reto de primera magnitud. En nuestro sistema biológico, este reto plantea algunos problemas parecidos a los de la electrónica y también otros propios

de la biología de las señales nerviosas. Un problema clave es el ruido inevitable asociado a los canales celulares que son, en último término, responsables de la propagación nerviosa. Al acercarnos a los límites de lo molecular, es imposible escapar de fenómenos que tienen que ver con las incertidumbres del mundo cuántico. Y en este límite hay leyes propias que no podemos saltarnos. Cuando disponemos de muchos componentes, sus cambios aleatorios son poco importantes, dado que dominan los efectos de sincronización entre elementos. Al reducir el tamaño de los componentes neuronales, reducimos también el número de canales y otras piezas de la maquinaria de señalización, lo que hará más probable que se comporten de forma aleatoria. Este desorden degradará profundamente la calidad de la transmisión. Así pues, ¿cómo sacar el máximo partido de nuestra mente? Nada como un buen sistema educativo y evitar sintonizar ciertos programas de televisión.

¿Es la inteligencia lo que nos define realmente como humanos? ¿Qué nos hace definitivamente distintos de cualquier otro organismo que habite o haya habitado alguna vez nuestro planeta? Ya hemos mencionado algunos aspectos de la singularidad de nuestra especie. Somos cooperadores, modificamos el medio en el que vivimos, poseemos un gran cerebro y empleamos un lenguaje con una complejidad única. Pero también poseemos cierta tendencia innata a actuar de una forma moralmente correcta y con una empatía natural hacia los demás. ¿Son estas propiedades condición necesaria para la aparición de nuestra especie?, ¿son inevitables? La presencia de un «cerebro moral» es un descubrimiento de enorme importancia, apoyado por evidencias diversas y contundentes. Tradicionalmente, se ha asociado la moralidad a algún tipo de herencia cultural y, más comúnmente, a la posesión de ideas de tipo religioso. Sin embargo, la realidad es que la evolución nos ha dotado de un sentido del bien y del mal. Por ejemplo, cuando se muestra a niños de pocos meses unos muñecos que representan buenos o malos comportamientos (que ayudan o molestan a otros muñecos), los niños eligen a los buenos en lugar de a los malos. Esta empatía es un reflejo de la forma en que la cooperación se ha trasladado a nuestro cerebro. De forma espontánea, cualquier ser humano reacciona prestando su ayuda a otro ser humano que llora o sufre o a un niño perdido que busca a sus padres. No hay barreras culturales pero sí un sustrato

neuronal profundo. Hay también ejemplos numerosos en la ciencia ficción de razas extraterrestres (normalmente humanoides) en las que cierto grado de desapego o frialdad parecen formar parte de su personalidad. El referente más célebre es el famoso *vulcaniano* Mister Spock, uno de los protagonistas más conocidos de la serie *Star Trek*, cuyas dificultades para comprender las emociones humanas lo ponen a menudo en aprietos.

Un elemento de enorme importancia en este contexto es la existencia de sistemas que permiten reconocer e imitar las emociones que se producen en la mente de otros. Estas «neuronas espejo» han sido identificadas en el cerebro de primates y de humanos, y su existencia puede ser una pieza clave de la evolución reciente de herramientas, arte o el mismo lenguaje. Su descubrimiento fue fortuito. Durante un experimento en el que se registraba la actividad cerebral de macacos en el laboratorio, se descubrió que cuando un individuo observaba las acciones de otro, en su cerebro se activaban las mismas zonas que se activarían si el propio individuo efectuara esas tareas. Dicho de otro modo, un cerebro «imitaba» al otro, de alguna manera actuando como un espejo. Las implicaciones de este hallazgo son enormes, y la existencia de este sistema es probablemente esencial en nuestra historia evolutiva. Un sistema que nos permite leer la mente de los demás.

Autores como Michael Arbib, uno de los teóricos más importantes de las redes neuronales, han incorporado circuitos específicos a sus robots o modelos de cerebros artificiales que representan a las neuronas espejo. Otros, como el neurocientífico V.S. Ramachandran, consideran a estos sistemas los responsables de la emergencia de nuestra civilización. Éste es, por supuesto, un asunto a debatir, pero hay que reconocer el enorme potencial de las neuronas espejo para considerar de qué forma hemos podido generar una civilización empática, en la que nuestro pasado animal dominado por las emociones ha sido sometido al control de un córtex frontal en el que nuestros congéneres dejan de ser simplemente «otros» para ser uno de los nuestros. Y creo que no es irrazonable pensar que para que una sociedad semejante sea posible, necesitaremos un sistema que nos permita «ponernos en el lugar del otro» y sintonizar con su alegría o sufrimiento.

El cuarto cerebro

¿Qué alternativas podríamos encontrar a la estructura de los agentes neuronales de nuestro cerebro?, ¿podría una inteligencia compleja adoptar sustratos distintos a los de un órgano como nuestro cerebro? La imagen del cerebro como sistema de referencia en nuestra comprensión de la inteligencia nos lleva a pensar en el órgano rosáceo que ocupa el interior de nuestro cráneo y que nos permite leer estas líneas con fluidez mientras establece todo tipo de conexiones con ideas, imágenes y conceptos. Muy posiblemente por la cabeza del lector habrá pasado una imagen del cerebro aislado, tal vez dentro de un frasco de formol (si no ha ocurrido antes, ocurre ahora mismo). Y quizá se haya creado ese estado peculiar de atención que surge cuando algo en nuestro entorno plantea una paradoja o simplemente una información inesperada. El título de esta sección sugiere algo peculiar que no encaja con nuestras expectativas. ¿Acaso no hay un único cerebro, sólo uno?

Para acercarnos de nuevo a lo posible, debemos recurrir a lo imposible. Un escenario alternativo nos lo sugiere *Solaris*, un clásico de Stanislaw Lem que ha sido llevado al cine en dos ocasiones. En esta novela, una misión en un planeta de otro sistema solar ha sufrido algún tipo de contratiempo indefinido (pero grave) que incluye la muerte de alguno de sus miembros. Por algún motivo desconocido, son incapaces de tomar la decisión de regresar, permaneciendo indefinidamente en órbita alrededor de Solaris. Un psicólogo es enviado para que investigue lo que ha ocurrido, y no tarda en descubrir (y experimentar) la causa por la que la tripulación es incapaz de volver. De alguna forma inexplicable, se materializan físicamente personas muy cercanas a los tripulantes, algunos de los cuales habían fallecido. Estos avatares son materiales y poseen recuerdos, aunque no son completos. De algún modo, el planeta es capaz de emplear la memoria de cada tripulante y generar una réplica (necesariamente incompleta) de hijos, mujeres o hermanos. Abandonarlos o abandonar el planeta no es una opción: ¿quién se separaría otra vez de un ser querido y desaparecido cuando se presenta una nueva oportunidad de estar con él? El relato prosigue y descubrimos que es el planeta, que opera como una entidad consciente, el responsable de crear a estos avatares físicos. Solaris sería un sistema cognitivo distribuido por todo

un mundo, en lugar de redes de neuronas o cerebros ocupando individuos aislados y con capacidad de reproducirse. ¿Podría existir un cerebro semejante?

Para responder a esta pregunta necesitaríamos disponer de una teoría de la evolución de la cognición, y esta teoría no existe. Pero sí existe un organismo que nos permite acercarnos a la cuestión de la inteligencia en un sistema carente de neuronas pero capaz de llevar a cabo algunas tareas muy complejas. Se trata de los hongos unicelulares del género *Physarum* (figura 4.5), que han sido objeto de intensa investigación desde que se demostrara que podían resolver un problema tan aparentemente intrincado como hallar la salida de un laberinto.

Physarum es especial en varios sentidos, y uno de ellos es su naturaleza unicelular: aunque la imagen de la figura 4.5 nos muestra un sistema de grandes dimensiones expandiendo su población por una placa de cultivo, se trata de una sola entidad celular, atravesada por tubos que transportan nutrientes y que le permiten distribuirse de forma característica. Una vez expandido, si en algún punto se encuentra con comida, por ejemplo un copo de cereal, se expande por el espacio circundante, explotando el recurso y repartiéndolo desde ese punto a otros lugares en los que también ha encontrado copos. En la figura vemos cinco copos conectados entre sí. Aunque carente de la sofisticación de un cerebro, este organismo puede resolver algunos problemas de una complejidad notable. Consideremos por ejemplo el problema práctico de determinar el mapa de carreteras que permita comunicar lo mejor posible un conjunto de ciudades empleando para ello los caminos más cortos, de forma que el coste de construcción sea mínimo. Tomemos un mapa real y situemos sobre éste las ciudades que queremos conectar. Si dejamos que un ordenador calcule el mapa de carreteras óptimo, puede hacerlo explorando todas y cada una de las posibles formas de hacer esta conexión. Pero un proceso de búsqueda sistemática en el que se ensayan todas las posibilidades tiene un coste altísimo, y de hecho puede requerir tanto tiempo de cálculo que haga inviable encontrar una solución razonable. Nuestro hongo no parece un rival para un ordenador, pero resulta ser, de hecho, mejor que éste. En la figura 4.5a-f vemos una secuencia de crecimiento de *Physarum* sobre una placa de cultivo, en la que en cada

«ciudad» se ha colocado una pequeña cantidad de alimento. El organismo se emplaza en una posición central (mancha mayor) y empieza rápidamente a expandirse hasta ocupar toda la superficie. Cada vez que se encuentra con una ciudad, inicia un proceso de explotación de los recursos que fluyen a través de los tubos conectores. Cuanto más cercanas están dos ciudades, mayor es el flujo, y como debe repartirse por otros caminos, en cierto momento observamos (figura 4.5d-e) que se ha formado una red con muchos canales. Sin embargo, los que describen un camino más corto se mantienen, mientras que los más largos experimentan menos flujo y acaban desapareciendo. Este proceso de selección de canales nos recuerda, de hecho, lo que ocurre en el sistema nervioso durante el desarrollo embrionario y especialmente en los primeros años de vida de un ser humano. Al principio se construyen multitud de conexiones neuronales, pero el aprendizaje recorta su número posteriormente. Al acabar el proceso, nuestro *Physarum* ha dejado un conjunto de caminos estables que resultan ser los mismos que los ingenieros han diseñado a lo largo de los años para unir ciudades en el país real. Tomad nota, humanos.

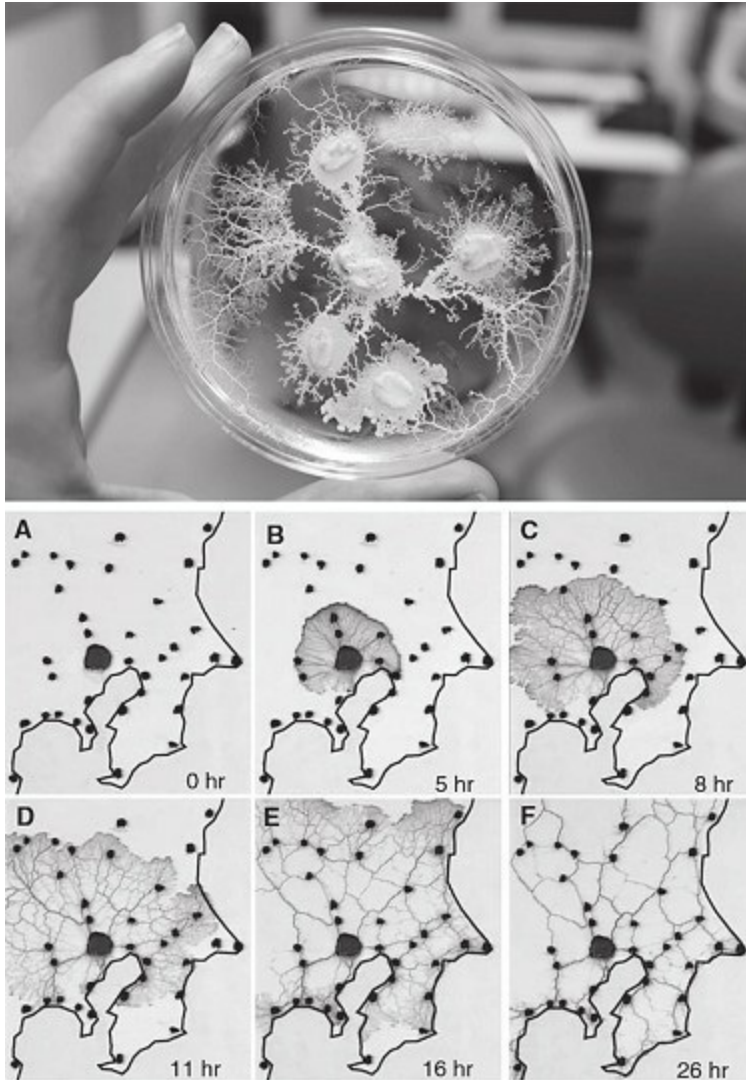


Figura 4.5. La inteligencia colectiva en un organismo unicelular. Los hongos del género *Physarum* se distribuyen de forma compleja sobre las placas de cultivo en las que crecen (arriba) y se ha demostrado que pueden resolver problemas complejos de optimización. En las figuras de abajo (a-f) se han colocado pequeñas cantidades de alimento (puntos oscuros) sobre una superficie en la que también se ha colocado una muestra de *Physarum* (mancha oscura central en (a)). Los puntos reproducen a escala la posición de diversas ciudades que el hongo unicelular, después de expandirse sobre toda la superficie, termina conectando mediante los caminos más eficientes. (Imágenes de Toshiyuki Nakagaki.)

Nuestro hongo unicelular puede parecer demasiado simple, pero su capacidad para resolver algunos problemas difíciles da que pensar. *Physarum* ha sido empleado para encontrar el camino de salida de laberintos y para diseñar circuitos computacionales distintos de aquellos que operan en nuestros dispositivos tecnológicos. Uno de los investigadores más conocidos

en este campo, Andrew Adamatzky, ha sugerido la idea de que este organismo podría definir las bases de un «cerebro alternativo», ya que se ha descubierto que esta especie muestra formas primitivas de percepción de estímulos mecánicos, visuales o químicos que constituyen de hecho las bases para un sistema cognitivo complejo.

La respuesta acerca de los cerebros posibles tal vez haya que buscarla entre especies exóticas, pero nuestro propio interior puede guardar algunas claves. Vayamos por partes. Nuestro cerebro está formado por dos tipos fundamentales de células: las neuronas y las llamadas células gliales, que constituyen la denominada *neuroglía* (o simplemente glía). Durante mucho tiempo la neuroglía se ha visto como un sistema de soporte y mantenimiento del cerebro. Las células gliales servirían de puntos de anclaje estables para apoyar la red neuronal masiva que procesa y crea información, ayudando a mantener las neuronas con vida, nutriéndolas constantemente. A diferencia de las neuronas, las células gliales pueden dividirse de forma normal durante la vida del individuo, asegurando así generaciones de células nuevas capaces de llevar a cabo su función. Esta capacidad de división es también la responsable de los tumores cerebrales (los glioblastomas) que aparecen como consecuencia de mutaciones en células de la glía durante su replicación. Lo más interesante de la neuroglía es, sin embargo, el descubrimiento de muchas características que poco tienen que ver con una función de apoyo. En las últimas décadas se ha comprobado que participa activamente en el procesamiento de información, en la formación de recuerdos y también en el desarrollo de algunas enfermedades neurodegenerativas. Debido a ello, algunos investigadores, como Douglas Fields, la han denominado «el otro cerebro».

¿Hay un tercer cerebro? Sin duda, y éste es un sistema que podríamos considerar muy alejado de las propiedades del órgano sólido y compacto, aunque posee la mayoría de los atributos de un sistema nervioso. Se trata del sistema inmunitario, que fluye mayoritariamente por nuestra sangre y posee un papel clave en la identificación de organismos o cuerpos extraños y su eliminación. Debido a su naturaleza fluida, debemos imaginarlo como una especie de red neuronal fluida, formada por millones de células con distintos roles, pero que funcionalmente puede ser descrito como un cerebro líquido

capaz de percibir señales, procesarlas y elaborar recuerdos. Cuando las células del sistema inmunitario detectan una molécula extraña (tal vez parte de un virus u otro patógeno), se produce un fenómeno de amplificación en el que las células especiales capaces de detectar la molécula se dividen con rapidez, formando una población que, posteriormente, cuando se haya eliminado la amenaza, se reducirá pero dejará tras de sí una memoria que hará que la respuesta sea mucho más rápida e intensa si vuelve a presentarse la amenaza. Es un sistema de computación paralela que cuida de nuestra salud y que, también, se comunica con los otros cerebros.

¿Hay un cuarto cerebro? Uno de los grandes descubrimientos de la ciencia del siglo XXI ha sido la constatación de que es preciso revisar a fondo el concepto de especie que teníamos hasta ahora, así como nuestra visión de los microorganismos que habitan nuestro cuerpo. Durante años hemos considerado a las bacterias como patógenos y tan sólo hemos simpatizado vagamente con ellas cuando nos referíamos a la «flora intestinal», que hemos reconocido necesaria para nuestra digestión. Pero hagamos una comparación. Consideremos el número de genes que posee nuestra especie. Se estima que suman unos 25.000. Pero a su vez la fauna microbiana de nuestros intestinos, la piel o la boca también acarrea una cantidad de genes muy superior, estimada en unos tres millones (figura 4.6). Estos microorganismos no son simples patógenos, que han alcanzado casualmente nuestro cuerpo. Por el contrario, han coevolucionado durante millones de años con nuestra fisiología, conectándose con nosotros de maneras profundas e intrincadas y pasando de generación en generación. El microbioma no sólo es corresponsable de muchos de nuestros procesos metabólicos y de defensa. Sus desequilibrios están relacionados o son responsables de numerosas enfermedades, entre las que hay que citar la obesidad, así como las respuestas autoinmunes que causan enfermedades como la diabetes, la artritis o la esclerosis múltiple y algunos tipos de cáncer. Lo que es más intrigante es que parece estar conectado también con el desarrollo del cerebro y con desórdenes del comportamiento y la salud mental. Éstos incluirían, entre otros, trastornos muy comunes como la ansiedad o la depresión, y tal vez

también otros como el autismo. La buena noticia es que esta conexión abre la puerta a una nueva ola de tratamientos médicos que podrían explotar nuestra capacidad de modificar las respuestas de los microbios implicados.

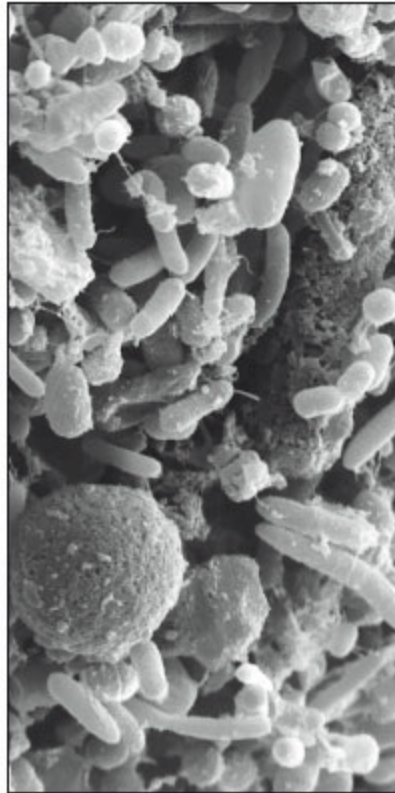


Figura 4.6. El microbioma define un ecosistema complejo que habita el interior de nuestro cuerpo y que ha coevolucionado con nosotros a lo largo de millones de años de vida compartida. En la imagen (al microscopio electrónico) se muestra un conjunto de células de distintos microorganismos que habitan el microbioma intestinal.

El microbioma es el cuarto cerebro con el que podríamos conversar con el resto de nuestro cuerpo e, incluso, con nuestros otros cerebros. Es mucho lo que hay que aprender todavía, y ello significa, entre otras cosas, estudiar otras fuentes de diversidad que pueden ser igualmente interesantes, como es el viroma humano: la aún más enorme diversidad de virus que interaccionan con las especies de bacterias que forman el microbioma. Al igual que hemos ido comprendiendo el funcionamiento de los ecosistemas, nos ha llegado el turno de mirar hacia nuestro interior con la visión del naturalista que descubre una selva inexplorada. Por otro lado, como señalan algunos investigadores, esta

historia común de coevolución entre humanos y el microbioma tiene una lectura evolutiva algo inquietante: ¿Quién ha sacado partido de quién aquí? Nos gusta creer que nuestro cerebro toma las decisiones y guía nuestra existencia consciente. Pero si el microbioma puede alterar nuestros procesos cognitivos, puede que sólo seamos en el fondo máquinas que transportan billones de microorganismos que aseguran su supervivencia haciendo que nuestra mente tome las decisiones adecuadas. Por supuesto que yo no me lo creo. Claro que tal vez mi microbioma quiera que piense así. Maldita sea.

5 Utopía(s)

O'Brien: ¿Cuántos dedos ves aquí, Winston?
Winston: Cuatro.
O'Brien: ¿Y si el Partido te dijese que son cinco?

George Orwell, 1984

Sea quien sea. Fue feliz mientras vivió. Todo el mundo es feliz ahora.

Aldous Huxley, *Un mundo feliz*

Doc Hollyday: ¿Qué piensas hacer? Wyatt Earp: Matarlos a todos.

Wyatt Earp

Retorno a Hailsham

¿Qué clase de personas seríamos si viviéramos en una sociedad hipercontrolada, como la de *1984*, de George Orwell? ¿Nos dejaríamos controlar o nos uniríamos a los rebeldes, arriesgando nuestras vidas? ¿Seríamos felices en el *Mundo feliz* de Aldous Huxley, perteneciendo a alguna de las clases preestablecidas? ¿Aceptaríamos vivir en un mundo en el que nuestro genoma decida cuáles son nuestras opciones vitales?, ¿podríamos eliminar sin remordimientos, como en *Blade Runner*, a *replicantes* creados por humanos? Los mundos distópicos de la literatura de ficción nos ofrecen la posibilidad de mirar a nuestra propia sociedad desde perspectivas que sólo la ficción permite. Resulta obvio que, por algún motivo, nos cautiva y atrae la narración de un mundo en el que la estructura de la sociedad parece obedecer reglas distintas a las que estamos acostumbrados. Y también podemos mirar a

nuestro propio planeta ahora, y contemplar la diversidad de formas de organización, desde pequeñas tribus del Amazonas hasta países atrapados por la visión demente de un dictador, como ocurre con Corea del Norte. Christopher Hitchens definía esta última, muy acertadamente, como «necrocracia»: el líder anterior, ya fallecido, fue también ascendido de nuevo (ya difunto) a jefe del Estado, y en la propaganda del país, como en toda religión organizada, el líder sigue vigilando a sus súbditos.

Los mismos relatos suelen también reflejar otro aspecto terrible de la realidad de un mundo sin reglas: el deterioro de las estructuras sociales, de los comportamientos «correctos», la disolución de la solidaridad en favor de la destrucción y el pillaje o la pérdida de la racionalidad en favor de la barbarie. Si quisiéramos hacer un recuento de libros y películas acerca del tema, la lista sería muy larga. En muchos casos, el mundo de las películas apocalípticas es un lugar en el que la violencia extrema suele ser dirigida por individuos con una predilección maniática por las gabardinas y pantalones de cuero, la cabeza rapada, botas largas y algunos *piercings*. El infantilismo de los argumentos va a la par de estas absurdas indumentarias, con las que recorren escenarios más propios de un *western*, en los que el sol aprieta de verdad. Afortunadamente nos salva la literatura, y en particular *La carretera*, la obra maestra del escritor norteamericano Cormac McCarthy, cuyos personajes centrales (un padre y su hijo de diez años) recorren un país irreconocible, gris y casi muerto, caminando sin cesar hacia el Sur, esperando encontrar los restos de un mundo desaparecido.

Pero el horror de la sociedad que se ha desintegrado puede palidecer frente a las alternativas de sociedades posibles en las que la «normalidad» no es menos inquietante. Un buen ejemplo es la novela *Nunca me abandones*, del escritor Kazuo Ishiguro, que nos sorprende con la historia de los niños del internado de Hailsham, situado en algún lugar de una Inglaterra imaginada. Los protagonistas han sido seleccionados para cumplir con una tarea esencial para la sociedad: proporcionar, una vez alcanzada la edad adecuada, sus órganos para trasplantes. Estas «donaciones» tienen lugar una tras otra, con la participación de médicos especializados, hasta que el donante muere. Sus personajes se nos muestran como individuos tan llenos de vida como vulnerables, protegidos pero a la vez marginados de la sociedad, que espera

de ellos el sacrificio involuntario. Así, unidos tan sólo por el desamparo, recorren sus años de juventud, que deben terminar, de forma inevitable, con la muerte de cada uno de ellos. Lo que hace que esta terrible historia parezca plausible es la naturalidad con que los personajes transitan en medio de una sociedad que acepta esta barbarie como un mal menor. Algo que se acepta en favor de un bien mayor, pese a un enorme coste. ¿Nos suena este argumento? Tal vez no a primera vista, pero es el mismo que se ha empleado durante siglos para someter a los esclavos («¿quién haría el trabajo si no lo hacen ellos?») o a las mujeres («son mejores que los hombres para llevar adelante a una familia») a una vida que recorta o elimina sus derechos.

Las novelas o películas distópicas nos ofrecen la imagen de una sociedad posible que puede ser maligna, benigna o simplemente distinta. Nuestro propio mundo nos ha dado ejemplos de formas alternativas de sociedad, desde las comunas libertarias basadas en la autogestión, hasta las dictaduras en las que el acatamiento de la verdad oficial (por absurda que ésta sea) pasa por la eliminación física del que discrepa. En Occidente solemos decir que nuestro sistema ha sido el más exitoso en cuanto a las libertades y calidad de vida de sus ciudadanos. Pero el éxito económico a cualquier coste y la dominación sin complejos del resto del mundo forman parte del camino seguido para alcanzar ese éxito. Y también debemos preguntarnos acerca de los límites que impone vivir en un mundo de recursos finitos: ¿podríamos haber desarrollado una sociedad avanzada sin disponer de recursos energéticos extraordinarios? En este capítulo exploraremos un territorio complejo: el universo de posibles sociedades que pudieron emerger en nuestro mundo y nunca lo hicieron, así como el papel que la energía ha desempeñado en el desarrollo de nuestra civilización como una posible clave para comprender cómo surge y se derrumba la sociedad compleja.

Tierra, agua, aire y petróleo

Algunos científicos han propuesto la idea de que la aparición de nuestra especie, capaz de modificar su medio natural, ha creado las condiciones para una nueva «era» dominada por nuestras acciones. En los últimos diez mil años, en el periodo conocido como Holoceno y que comenzó tras la última

gran glaciación, los seres humanos fueron capaces de florecer e iniciar su transformación de la biosfera. Si observamos los registros obtenidos del estudio del hielo de Groenlandia, vemos que las estimaciones de temperatura han fluctuado de forma considerable y abrupta durante miles de años. Pero la llegada de la agricultura y de nuestra acción sobre la biosfera cambió por completo las cosas (véase la figura 5.1). A lo largo del Holoceno observamos una estabilidad inusitada, pero la calma se termina al final de este periodo, y las cosas han cambiado enormemente. En los años ochenta del pasado siglo, el ecólogo Eugene Stoermer propuso la idea de que los humanos habían iniciado el Antropoceno: una era dominada por cambios a gran escala relacionados con nuestro uso intensivo de combustibles fósiles. El término procede de la raíz griega «*Anthropos*», que significa «humano» y «*kainos*», «reciente». Esta definición resulta de lo más adecuada si consideramos que las eras geológicas se suelen detectar gracias al estudio de los fósiles, así como de otras fuentes de información relacionadas con el clima (ya sean sedimentos o registros de hielo) que nos muestran cambios en las temperaturas y abundancia de gases atmosféricos. Si un explorador del espacio llegara a nuestro planeta dentro de unos miles de años y estudiara la historia de nuestro mundo, en su informe dejaría constancia de unas anomalías recientes de enorme magnitud, nunca antes vistas en el resto del registro fósil, y que se situarían en una época reciente en la que una especie de bípedo (cuyos restos se hallan por doquier) se impuso al resto de la biosfera para actuar como una verdadera fuerza geológica. Entre otras cosas, el explorador hallaría evidencias de un crecimiento rápido en las temperaturas medias asociado a una acumulación aún más rápida de dióxido de carbono. Este periodo estaría acompañado por un crecimiento explosivo de la población humana, el dominio de la tierra dedicada al cultivo de cereales, un declive de las reservas de agua dulce, un gran número de especies extinguidas y el desarrollo de megacentros urbanos.

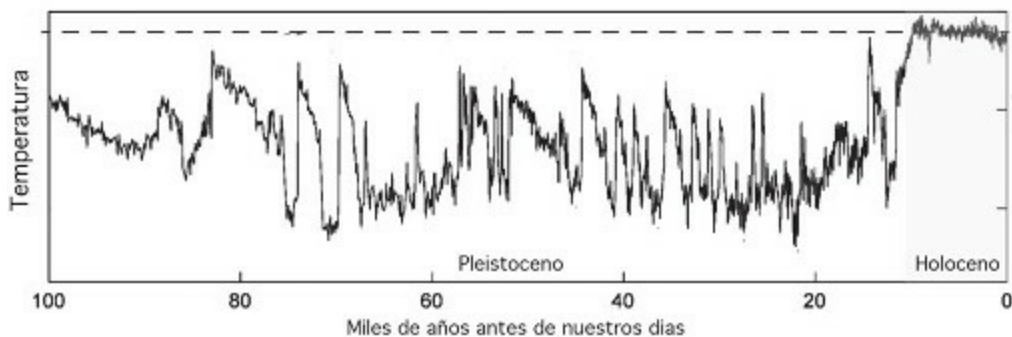


Figura 5.1. Los valores de temperatura registrados en los hielos de Groenlandia reflejan una serie de cambios que en muchas ocasiones son abruptos, hasta la llegada del Holoceno, que incluye los últimos 10.000 años y que muestra una gran constancia en la temperatura media. Esta tendencia se ha mantenido hasta hace un par de siglos, cuando la actividad humana y el empleo de combustibles fósiles ha iniciado un proceso de calentamiento global acelerado.

El Antropoceno se hizo famoso gracias sobre todo al desarrollo del concepto por parte del climatólogo y químico Paul Crutzen. Crutzen recibió el Premio Nobel de Química por su trabajo acerca de la formación del agujero de la capa de ozono y junto con otros investigadores impulsó el estudio de las consecuencias de una guerra nuclear sobre la atmósfera, lo que

llevó a formular el concepto de «invierno nuclear». En el año 2000, publicó junto con Stoermer un trabajo muy influyente en el que proponían el final del siglo XVIII como el momento inicial de esta nueva era: el Antropoceno. El núcleo de la propuesta, como cabía esperar, es la evidencia demoledora de un incremento rápido de los gases de efecto invernadero, que coincide con el comienzo de la Revolución industrial. El Antropoceno es el punto final del Holoceno y cabe preguntarse cómo terminará esta época de dominación humana. Lo que sí podemos decir es que para que esta nueva era fuera posible, era necesario liberar una energía que había estado atrapada en nuestro planeta durante millones de años.

Para poder crear y mantener un sistema vivo, ya sea una bacteria, un animal o una planta, es necesario que este sistema disponga de un flujo de energía y materia que pueda ser utilizado para mantener y renovar las estructuras biológicas a lo largo del tiempo. Del mismo modo, cualquier sociedad de mínima complejidad requiere el empleo de fuentes de energía que permitan reemplazar el esfuerzo humano por procedimientos para transformar la caída del agua o la fuerza del viento en el movimiento de máquinas. La capacidad de llevar a cabo esta transferencia, pero especialmente su magnitud, decide en gran medida hasta dónde puede llegar la complejidad de una sociedad. La naturaleza ha sido capaz de emplear otras fuentes de energía, en particular la del Sol, para construir gran parte de la biosfera. Hoy intentamos extraer esta energía a partir de una compleja tecnología basada en el empleo de placas solares, a la vez que intentamos reproducir los procesos de fusión que tienen lugar en el interior del Sol. Los molinos de agua fueron posiblemente el primer éxito de esta capacidad de transformación (figura 5.2). Estos sistemas habían propulsado nuevas formas de llevar a cabo tareas arduas que requerían un gran esfuerzo físico, como moler el grano para obtener harina, prensar aceitunas o curtir pieles.

El molino de agua revolucionó el mundo. En Europa, estos artefactos se fueron expandiendo por todas partes, convirtiéndose en parte del paisaje fluvial. Pero la energía que pueden proporcionar es limitada e incomparable con la que puede extraerse del empleo de combustibles fósiles como el carbón. La formación de los gigantescos depósitos de este mineral tuvo lugar durante el periodo carbonífero, que se inicia hace unos 360 millones de años

y termina hace 300 millones. En este intervalo, se dieron condiciones de humedad y calor que favorecieron enormemente el éxito ecológico de las plantas, que se desarrollaban en una atmósfera con la mayor cantidad de oxígeno de la historia del planeta (un 35 por ciento, comparado con el dos por ciento actual). La vegetación del carbonífero creció con rapidez y además lo hizo formando una corteza muy gruesa dominada por células cuyas paredes estaban soportadas por moléculas enormemente estables. La más importante con diferencia fue la lignina, un polímero orgánico de gran complejidad (figura 5.3) que hacía impermeables las paredes celulares y daba rigidez estructural a aquellas grandes plantas. Además, permitían resistir el ataque de posibles microorganismos (que hubieran degradado su estructura) y, en último término, la fosilización de la biomasa, que se convertiría en el motor de la Revolución industrial. Las plantas superiores pudieron así desarrollar sistemas de transporte de fluidos a lo largo de sus troncos y dotarse de grandes cantidades de hojas. Aquella ecología peculiar terminó con un colapso global: los enormes bosques tropicales se vinieron abajo debido a un cambio de clima, que se hizo más seco y frío. Toda aquella biomasa se incorporó a la geología del planeta, congelada en el subsuelo hasta que una especie singular —la nuestra— dio con ella y comprendió su potencial.

El carbón almacenó grandes cantidades de energía procedente del Sol que podía ser explotada con una eficiencia muy superior a la de la madera. Su uso permitió desarrollar una industria del hierro y más tarde la del acero, a una velocidad que hubiera sido imposible en otras condiciones. Se ha calculado, por ejemplo, que una tonelada de hierro habría requerido diez hectáreas de bosque talado para obtener la madera necesaria para producirla, frente a las apenas cinco toneladas de carbón que serían necesarias para lograr el mismo objetivo. Asimismo, se ha estimado que reemplazar el carbón empleado en Inglaterra a principios del siglo XIX por la madera habría requerido talar una superficie de bosque mayor que la de todo el país. Estas limitaciones no sólo lo son para el desarrollo de la tecnología. Como ha señalado el historiador alemán Rolf Sieferle, el carbón sirvió para evitar el destino de otras sociedades que crecieron con rapidez y terminaron por extinguirse. Pero lo más importante es que esta fuente de energía también creó las condiciones para impulsar el desarrollo de innovaciones que cambiaron la historia, como

la máquina de vapor y el ferrocarril. Este último resolvió el problema del costoso transporte de mercancías por tierra (el fluvial o marino ya estaban resueltos) y el desarrollo de herramientas de hierro a bajo coste para la agricultura, que experimentó un nuevo renacimiento. Y el mismo carbón no sólo era extraído sino que llegaba a todas partes. Su uso permitió también el desarrollo del cemento que se emplearía en canales, casas, fortalezas o muelles, sin necesidad de emplear madera como combustible. Toda una revolución.



Figura 5.2. Los molinos de viento o de agua (como el de la imagen) permitieron durante mucho tiempo incrementar la producción de alimentos y su manufactura gracias al empleo de la energía mecánica, que permitía reemplazar una gran cantidad de mano de obra. (Fotografía de Jean-Pol Grandmont.)

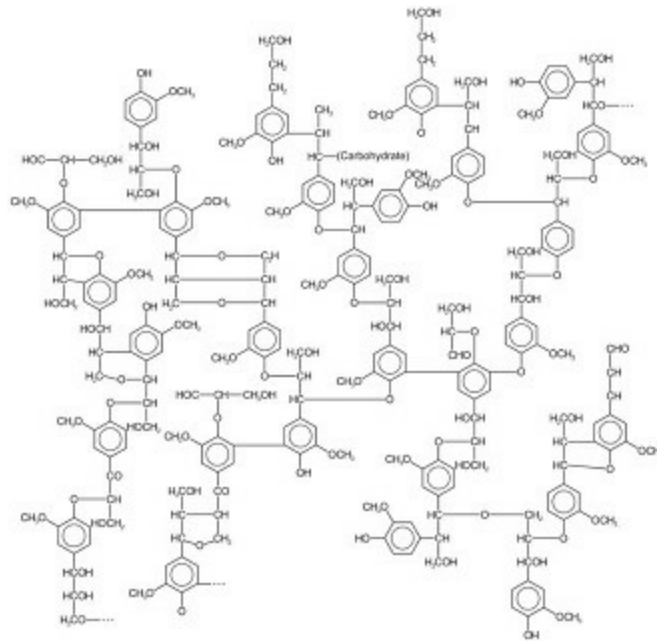


Figura 5.3. La lignina es una de las moléculas más abundantes en el mundo vegetal, y el componente mayoritario de la madera. Se encuentra en las paredes de las células y su estructura, enormemente estable, impide el ataque por parte de microorganismos. Esta propiedad clave ha permitido el almacenamiento de los enormes depósitos de combustibles fósiles. (Dibujo de Karol Glab.)

La cuestión clave aquí es si otras alternativas a la energía del carbón podrían haber permitido el desarrollo de nuestra civilización tal y como la conocemos, sin dejar al margen la urbanización a gran escala y una tecnología avanzada. Como ya hemos mencionado, la explotación de los bosques como recurso (la biomasa no fosilizada) tiene límites de sostenibilidad que no son superables. Podemos considerar como alternativa la energía hidroeléctrica, que requiere de forma inevitable la existencia de numerosos embalses. Esta tecnología no es moderna: en el siglo XII se construyó en Francia una de las primeras grandes presas: la de Bazacle, en Toulouse, de más de 400 metros de longitud. ¿Cuántas presas similares se necesitarían para proporcionar la energía que Inglaterra y Gales obtuvieron del carbón durante los primeros cincuenta años del siglo XIX? Se ha estimado que alrededor de ocho mil. Es un número disparatado, ya que si nos preguntamos cómo las construimos, llegamos a una contradicción: para hacerlo, necesitaríamos una fuente de energía barata y rica. Sin carbón para preparar cemento y ladrillos, es imposible. Aunque algunos estudiosos dejan abierta (con reticencias) la puerta a un desarrollo avanzado basado en otras

fuentes de energía siguiendo un proceso más lento y sostenido, las fragilidades de este escenario son numerosas. Una sociedad avanzada y compleja creada alrededor de la ciudad y con una entrada limitada de energía puede ser presa fácil de las veleidades del clima, las enfermedades infecciosas u otros accidentes inevitables. Reparar y regenerar el sistema necesita de recursos de acceso fácil, y sólo puede obtenerse a partir de una fuente de energía barata y que produzca rápidamente sus efectos. El carbón ha sido fundamental para alcanzar esta situación. El petróleo lo ha reemplazado como combustible fósil, pero las bases son las mismas. Aunque el desarrollo de la energía solar no asociada a la biomasa es una posibilidad, la tecnología fotovoltaica ha requerido toda una ingeniería surgida a caballo de la Revolución industrial, impulsada a su vez por el carbón.

Un mundo alternativo sin carbón se vería arrastrado con seguridad a un desarrollo urbano muy alejado del que se forjó durante la Revolución industrial. Pero también nos hemos precipitado a un escenario de calentamiento global que nos coloca al borde del precipicio. Hace años, el astrónomo Frank Drake hizo un ejercicio de cálculo en el que intentaba determinar el número de mundos habitados por una civilización avanzada capaz de comunicarse con otros mundos. Para ello, Drake empleaba varios factores que estiman las probabilidades de que exista una estrella de masa similar a la de nuestro Sol, la probabilidad de que existan planetas orbitando alrededor de ella o la de que se den las condiciones para el desarrollo de vida. El último factor en la ecuación de Drake es el periodo de vida —por decirlo así— de la civilización en cuestión. Aunque este cálculo es en gran medida especulativo y desde su planteamiento a principios de los años sesenta ha sido revisado en profundidad, nos plantea dos cuestiones relevantes. Una — que entonces formaba parte de los miedos surgidos de la guerra fría— es la posibilidad de aniquilación como resultado de una conflagración nuclear. Pero la segunda puede ser mucho más determinante, aunque define una moneda de dos caras: la presencia o ausencia de combustibles fósiles podría decidir la existencia de una tecnología avanzada.

En la cruz de la moneda tenemos las consecuencias de su empleo intensivo, que de forma inevitable modificará el clima del planeta. Habría que añadir a la ecuación un término para la probabilidad de disponer de

combustibles fósiles y otro para la capacidad de la civilización de comprender las consecuencias de un uso inadecuado. Viendo de qué forma nuestra especie ha manejado la situación en nuestro propio planeta, deseo fervientemente que haya vida inteligente en el universo. En alguna parte.

Un mundo infeliz

Probablemente, la distopía más conocida de la literatura que aborda los muchos mundos posibles y las versiones perversas de nuestro futuro como especie sea *Un mundo feliz*, de Aldous Huxley. En esta historia la modificación genética desempeña un papel principal, ya que en el mundo de Huxley no existe el parto natural y los embriones han sido modificados genéticamente para desempeñar determinadas tareas y para que posean niveles intelectuales muy distintos que los clasifican de inmediato en unas «castas» bien definidas. Se trata de un universo alternativo en el que la guerra ha pasado a la historia y la pobreza ha sido erradicada, todo gracias a una tecnología que permite a los humanos (o casi humanos) vivir sin necesidad de luchar por su existencia, aunque en un mundo que percibimos como enormemente deshumanizado. Como ocurre en *Fahrenheit 451*, de Ray Bradbury, o en *1984*, de George Orwell, ésta es una sociedad prefabricada en la que se renuncia a la reflexión crítica, la filosofía o la diversidad de pensamiento. En el mundo de Huxley los libros no existen. En el de Bradbury, deben ser quemados. En el de Orwell, la misma narración histórica es fabricada una y otra vez. Este desprecio (y miedo) por el poder de la lectura me recuerda lo que la escritora norteamericana Emily Dickinson afirmó en una ocasión: «Para viajar lejos, no hay mejor nave que un libro». Los libros son el refugio del rebelde y la playa solitaria del viajero mental. No es casualidad que los relatos distópicos incluyan en la mayoría de los casos la eliminación de los libros (y de los rebeldes). No es casualidad tampoco que las religiones organizadas se basen en la relectura permanente (y a veces exclusiva) de un solo libro, dedicado en mayor o menor medida a demonizar a los seguidores de los otros cultos.

En el Mundo Feliz de Huxley se da algo así como una ingeniería de la felicidad que debe ser acatada sin fisuras. Los alfa son la casta dominante, los más inteligentes y los que tienen menos exigencias de trabajo físico. Los beta vienen a continuación como subordinados de los primeros, y, por último, los gamma, delta y épsilon están obligados a ejercer un trabajo más duro y presentan un menor «nivel mental». La sociedad vive bajo una constante proclamación de la igualdad de castas, y las razas no son ya un problema. La propaganda, en definitiva, es indisoluble del ejercicio de una autoridad brutal, aunque pueda parecer que su rostro es amable. Dentro de la diversidad de mundos paralelos que cohabitan en nuestro pequeño planeta, hemos visto en el pasado, y podemos desgraciadamente ver también hoy, diversas versiones de estos cuentos de terror. La Corea del Norte actual, en la que una monarquía de facto va perpetuando al dictador absoluto en el poder, no es distinta de la sociedad descrita en *1984*, en la que se inventa al enemigo y se ensalza al líder absoluto. Estas similitudes, y el hecho de que la gran mayoría de las narraciones de ficción posean tantos elementos comunes, hacen pensar que también existe una lógica de los monstruos en el repertorio de posibles sociedades que podemos construir. Volveremos a ello más adelante. Afortunadamente para el sufrido lector, siempre hay un individuo que se aparta de la norma, que se siente excluido o que —simplemente— piensa por sí mismo. Un individuo perseguido que a menudo logra escapar a otro lugar en el que existe una vida alternativa donde las ideas diferentes no son asfixiadas. Creo que nuestra predilección por las historias en las que el protagonista se rebela contra el sistema nos debería dar esperanzas sobre nuestro futuro.

En muchas de estas historias, la genética y la posibilidad de crear embriones a la carta o de seleccionar el patrimonio genético tienen un papel central. De forma implícita o explícita, estos futuros alternativos describen formas avanzadas de modificar el código genético de los seres humanos de forma totalmente predecible. A menudo nos encontramos con versiones más o menos directas de la pseudociencia conocida como eugenesia, que inspiró no pocas ideas absurdas acerca de la naturaleza humana y, lo que es peor, dio argumentos a diversos genocidas para exterminar a los que consideraban inferiores o simplemente distintos. En la película *Gattaca*, de Andrew Niccol,

la selección de embriones se lleva a cabo de tal modo que la sociedad se divide en dos grandes grupos (lo que nos recuerda a la novela de Huxley): los válidos y los inválidos. *Gattaca* nos sitúa en un mundo en el que el análisis del genoma y su secuenciación son procesos rutinarios, de modo que cualquier individuo que pretenda acceder a un trabajo será objeto de una inspección de su genoma que permita identificar posibles tendencias a desarrollar enfermedades. En 1997, cuando la película llegó a las pantallas, la idea de una tecnología capaz de secuenciar un genoma en unos minutos y a bajo coste parecía un disparate: en realidad, el precio se situaría en aquel momento en un centenar de millones de dólares y el proceso estaba lejos de ser rápido. Pero la tecnología ha avanzado con gran rapidez, y en el año 2015 el mismo genoma ya podía ser secuenciado a un coste de unos mil dólares, así que hay que reconocer el acierto de la predicción. Lo que resulta mucho más discutible es la validez del determinismo genético que destilan estos relatos. ¿Podríamos realmente crear un ser humano con unos atributos físicos y mentales predeterminados?, ¿se podría construir una sociedad de castas bien definidas mediante la ingeniería del genoma?

Una respuesta afirmativa a la pregunta anterior parece surgir del estudio de enfermedades con base en los genes. Desde los inicios de la genética, hemos sabido que la presencia o ausencia (o mutación) de determinados genes da lugar a enfermedades o cambios físicos fácilmente identificables. La selección de embriones es una consecuencia práctica de esta capacidad de identificar genes clave cuya mutación puede causar la muerte o dar lugar a malformaciones. Gracias a las técnicas existentes, es posible identificar, entre varios embriones, aquel que es portador de la combinación letal. Esta capacidad para señalar genes causantes de problemas se confunde muy a menudo con una capacidad de señalar las causas de la normalidad. Sin embargo, esta conclusión está muy lejos de la verdad. Incluso en aquellos síndromes que tienen una base genética, la relación causa-efecto suele ser enormemente compleja.

Tomemos por ejemplo el síndrome de Down, causado por una copia adicional del cromosoma 21. Un ser humano que ha seguido un desarrollo embrionario normal posee 23 pares de cromosomas, que se reparten de forma desigual los aproximadamente 20.000 genes y cantidades ingentes de ADN

sin información de ninguna clase. Un error en alguna fase inicial del desarrollo puede dar lugar a copias extra de un cromosoma, con lo que todos los genes que éste transporta consigo son copiados. En el caso del cromosoma 21, su copia extra (figura 5.4) tiene consecuencias sobre las capacidades cognitivas, favorece el desarrollo de la enfermedad de Alzheimer y otros procesos asociados habitualmente con el envejecimiento, aumenta las probabilidades de desarrollar ciertos tipos de leucemia y da lugar a problemas cardiacos. Pero también observamos en estos individuos una incidencia muy inferior en la mayoría de tumores sólidos, lo que sugiere que algunos de los genes duplicados dan cierta protección frente a la aparición de cáncer. Ésta es una situación muy habitual: los cambios en una parte de nuestro organismo suelen tener contrapartidas, positivas y negativas, en otras partes.

Todas estas propiedades y su complejidad cuestionan —incluso a este nivel— la idea de que los atributos de un ser humano pueden describirse de forma simple basándonos en un conjunto de genes. Es cierto que la presencia o ausencia de algunos marcadores genéticos y una buena cantidad de estadísticas permiten establecer reglas bien definidas para prevenir (o prepararse para) el desarrollo de algunos tipos de cáncer. Pero prevenir la enfermedad no es lo mismo que predecir al ser humano a partir de su genoma. El motivo de esta falta de determinismo, y en consecuencia la poca credibilidad de los paraísos eugenésicos, se encuentra en la ausencia de una regla del tipo «un gen, un carácter» que prometía la genética de Mendel, pero que ha resultado ser la excepción en lugar de la regla. La gran mayoría de genes participan de un diálogo con otros genes. Si imaginamos cada gen como un interruptor con dos estados ON y OFF, cada gen puede estar activo o inactivo y alterar el estado de otros genes con los que se conecta. Al trazar el mapa de estas conexiones, obtenemos una red muy intrincada. Cada vez que un gen se modifica, sus efectos se propagan a través del circuito, de forma que los cambios en un gen que afecta a ciertos procesos pueden afectar a genes que se hallan implicados en procesos totalmente distintos. Además, existe una información igualmente compleja que reside en la epigenética, esto es, en los cambios genéticos asociados a factores ambientales que tienen también capacidad para regular la actividad de los genes. Hoy sabemos que incluso gemelos genéticamente idénticos pueden desarrollar rasgos físicos,

psicológicos o fisiológicos completamente distintos. Aunque quisiéramos crear un niño con «la genética de un Hitler» (si ello tuviera algún sentido), es improbable que éste decidiera luego invadir Polonia.

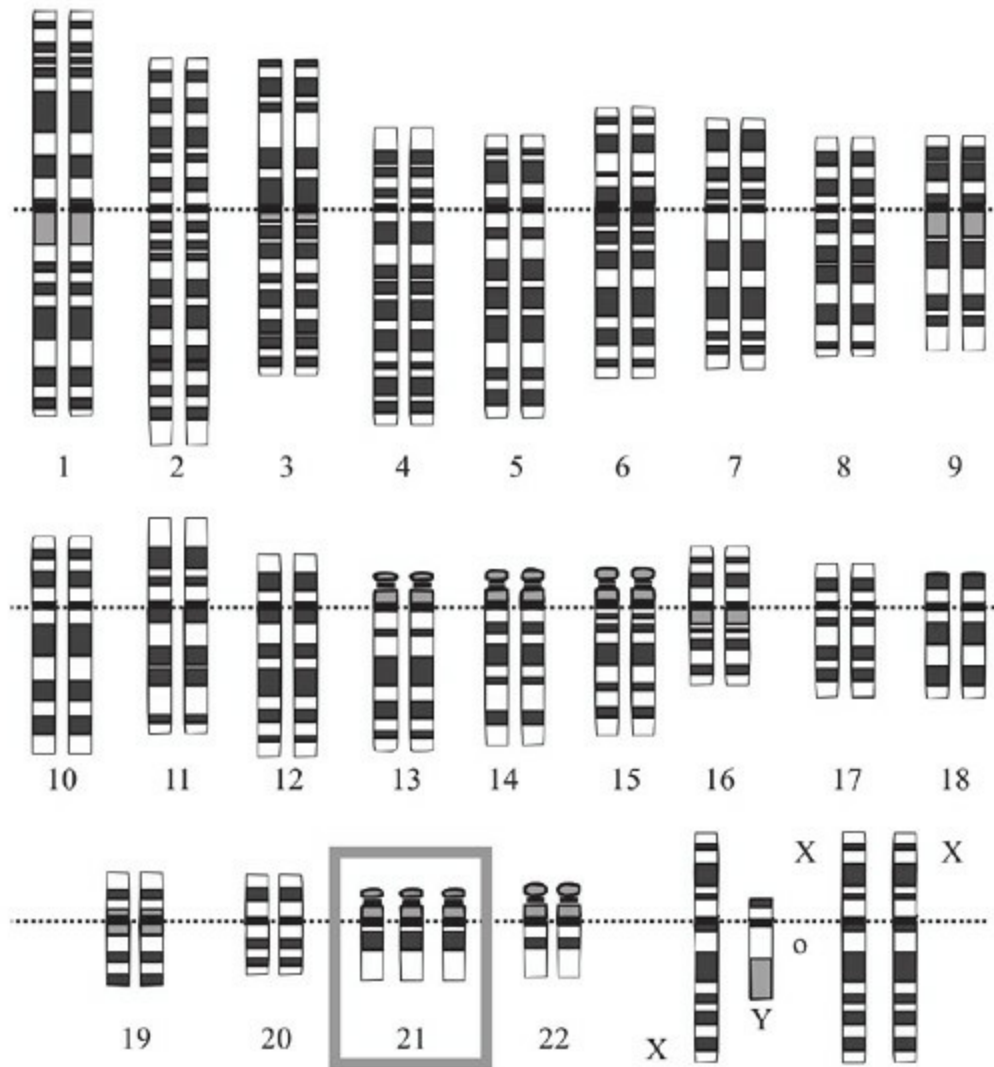


Figura 5.4. Composición cromosómica de un individuo con síndrome de Down. Cada humano posee 23 pares de cromosomas (los hombres tienen entre éstos un par XY y las mujeres XX). En este caso, como indica el recuadro gris, tenemos tres copias del cromosoma 21. (Imagen de National Institutes of Health.)

¿Podría una ingeniería del genoma crear una sociedad a la medida de los sueños de algún iluminado? La respuesta es negativa. Incluso en el caso en que se pudiera modificar el «nivel mental» de los individuos mediante el

empleo de cambios genéticos o epigenéticos que dieran lugar a un retraso cognitivo o cambios en el comportamiento, el alcance de éstos y la posibilidad de que el ambiente contrarrestara sus efectos convierten esta alternativa en papel mojado. Para diseñar un ser humano a la carta habría que tener una mente capaz de analizar y predecir todos los posibles cambios genéticos derivados del diseño deseado. Aquí debemos hacer un necesario ejercicio de humildad: los secretos de las redes genéticas y de su intrincada arquitectura no nos pertenecen. Y cualquier grupo de individuos de nuestra especie tiene además un gran espectro de peculiaridades mentales y cognitivas que hacen imposible la homogeneidad ideal que requieren estas sociedades diseñadas.

Por desgracia, tampoco necesitamos de la genética para crear un mundo de pesadilla. Las castas, por ejemplo, no son una invención nueva y en la India son una realidad dolorosa, basada en tradiciones cuyo origen y consecuencias no tienen mucho que envidiar a las peores distopías. Los intocables, sin importar su verdadero potencial intelectual, son considerados y tratados por las castas superiores como seres inferiores, que no deben mezclarse con las otras castas. Aunque estas divisiones (que persistieron durante milenios) fueron abolidas a mediados del siglo xx, en gran medida siguen vigentes hoy en día. Del mismo modo, la mayoría de las religiones relega a las mujeres a una ciudadanía de segunda, cuando no les niega sus derechos más fundamentales. Y los desgraciados ciudadanos de Corea del Norte se hallan expuestos, como bajo el gobierno del Gran Hermano, a una propaganda brutal que, junto con un control permanente, permite la supervivencia del régimen. El miedo es un arma mucho más efectiva que la genética más sofisticada. Sólo cabe desear que, como sucede en la literatura, haya ciudadanos que desafíen las normas establecidas o a los tiranos impuestos. Y que tengan mucha suerte.

Cooperar o morir

Pocas cosas nos atraen tanto como la búsqueda del misterio. En mi infancia, las películas de aventuras, con todos sus peligros, monstruos y héroes, eran una fiesta para la imaginación. Las historias de ciudades

perdidas, engullidas por las lianas de una selva inexplorada o sumergidas en las profundidades del mar, eran una de las pocas cosas que podían generar un silencio sepulcral en nuestra casa. Muchas de las películas creadas a lo largo del siglo XX se inspiraron (mejor o peor) en expediciones llevadas a cabo en distintos lugares del mundo. Nadie puede escapar al extraño encanto del silencio que se apodera de una ciudad abandonada. John Lloyd Stephens, que descubrió las ruinas de las ciudades mayas de Centroamérica, nos cuenta su primera visión de la ciudad de Chichén Itzá, que encontraron invadida por grandes árboles y sepultada por la vegetación en la selva de Copán (figura 5.5):

La ciudad en ruinas yacía ante nosotros como un barco naufragado en alta mar que hubiera perdido sus mástiles, cuyo nombre hubiera desaparecido, cuya tripulación hubiera muerto, y nadie supiera decirnos de dónde procedía, ni a quién perteneció, ni cuánto tiempo había navegado, ni cuál había sido la causa del naufragio.

Chichén Itzá es todo un símbolo del colapso social que ha afectado a la práctica totalidad de las grandes civilizaciones que nos han precedido. Había permanecido abandonada durante siglos, antes de la llegada de los conquistadores españoles, y su destino había quedado sellado mucho antes, tras décadas de lucha contra una sequía prolongada y los conflictos resultantes de la escasez y sobreexplotación de recursos. En este caso, como en muchos otros, encontramos un esquema que se repite en aquellos grandes centros que acaban desapareciendo. Aparecen murallas gruesas, se construyen las residencias en lugares menos accesibles y encontramos sistemas de almacenamiento de grano y agua en el interior de las fortalezas. Finalmente, podemos ver las señales de batallas encarnizadas que terminan con la desintegración del orden social.

El relato de Stephens posee una contrapartida igualmente real y positiva. Estas ciudades surgen como resultado de una de las grandes virtudes de nuestra especie: la cooperación. Somos una especie singular, tal y como afirmábamos en el capítulo sobre la mente, y nuestro éxito evolutivo se basa en esta sutil propiedad compartida con muchos otros sistemas que innovaron más allá de una biología basada en la reproducción y la selección natural. Dotados de un lenguaje que no tiene equivalente en ninguna otra especie y capaces de manipular el entorno para adaptarlo a nuestras necesidades, hemos

podido superar barreras infranqueables gracias a una combinación de sometimiento de la naturaleza y previsión. Como ha señalado el físico Jorge Wagensberg, uno de los motores que han impulsado la evolución de la complejidad en el mundo es la posibilidad de reducir la incertidumbre que nos impone el medio en el que vivimos. Éste parece un principio universal, y probablemente subyace en la capacidad que tiene la vida para adoptar formas de mayor complejidad pese al coste que representa poseer más células, estructuras de soporte más complejas o sistemas de percepción del mundo externo. Dicho de otra forma: si lo fácil y menos costoso es una forma de vida unicelular, ¿por qué desarrollar sistemas multicelulares? La clave, de nuevo, es la cooperación. En la larga cadena de innovaciones que nos separan de la primera célula viva, la aparición de la cooperación ha sido esencial para el triunfo de la complejidad biológica. Y cada paso dado ha proporcionado una forma mejorada de adaptación a los cambios externos. Con la aparición de los sistemas de percepción y memoria y más tarde del lenguaje, surge un nuevo tipo de información que no se almacena en el genoma. Para nosotros, esta forma de interactuar con el mundo nos ha transformado en una fuerza geológica. Hemos cooperado para explotar los recursos naturales y cambiar los ecosistemas, inventando la agricultura como una forma de reducir nuestra dependencia de los avatares del clima, a la vez que cambiamos los refugios naturales por construcciones de fabricación propia. Cooperando hemos podido llegar muy lejos. ¿Por qué fracasamos entonces? ¿Qué hace que el colapso social, la guerra y otras formas de brutalidad acaben con lo que era una ventaja para todos?



Figura 5.5. Una de las famosas litografías realizadas por Frederick Catherwood, que acompañó al explorador y diplomático John Lloyd Stephens. Este dibujo (de 1844) muestra una de las impresionantes estelas mayas que encontraron en la selva de Copán durante la expedición que localizó la ciudad de Chichén Itzá.

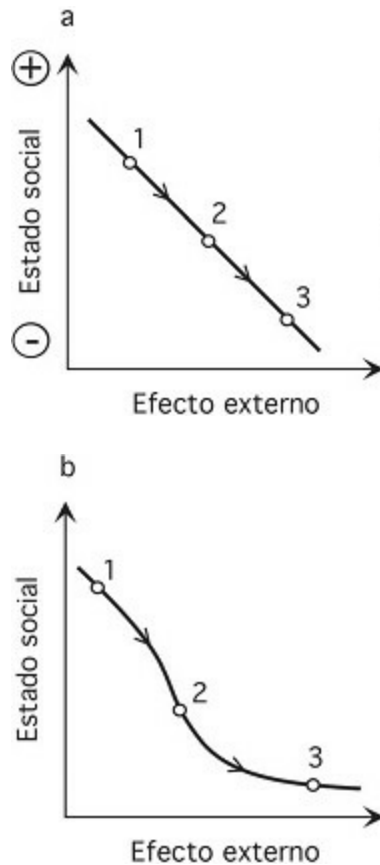
La cooperación también surge en un grupo muy distinto de organismos que construyen sus viviendas, forman grandes masas de individuos en interacción, desarrollan ocasionalmente una agricultura o una ganadería y modifican los flujos de energía de los ecosistemas que habitan. A este grupo pertenecen los insectos sociales como, entre otros, las termitas, las hormigas y las abejas. Son también grandes triunfadores en la historia evolutiva, y representan una forma distinta de inteligencia. En este caso, cada individuo es cognitivamente simple (aunque desconocemos hasta qué punto) e incapaz en general de tomar decisiones individuales. Pero el grupo lleva a cabo hazañas de ingeniería extraordinarias y es capaz de aprender, establecer las necesidades de la colonia y propagar información a todo el sistema cuando es necesario. Este *superorganismo*, como habitualmente nos referimos a las sociedades de insectos, posee una inteligencia colectiva que se sostiene en dos pilares básicos: la sociedad está por encima del individuo (que es sacrificable) y la cognición reside en el sistema, no en el cerebro individual. La única sociedad (por llamarla de algún modo) en la que individuos dotados de un cerebro complejo constituyen una colonia similar nos la da la ficción: los Borg de *Star Trek*, una raza de alienígenas que comparten cierto tipo de conciencia y que son súbditos de una reina. Detengámonos un momento a analizar esta sociedad. ¿Es ésta una sociedad posible? Hay en ella diversas diferencias con respecto al hormiguero: en la sociedad Borg, la reina no sólo pone huevos, sino que ejerce un poder absoluto sobre su colonia. Por otra parte, los Borg son el resultado de un diseño que combina lo biológico y lo artificial. Aunque no es posible afirmar que esta organización (no tan distinta de una dictadura) no pudiera surgir en alguna parte del universo, algunas observaciones cuestionan su existencia. Si miramos a las colonias de hormigas, disponemos de un repertorio enormemente variado de niveles de complejidad individual y colectiva, que han evolucionado siguiendo trayectorias muy diversas. Y observamos una tendencia interesante: cuanto más compleja es la colonia, más individuos posee y menos complejidad encontramos en cada uno de sus componentes. En colonias pequeñas, los individuos poseen más posibilidades de tomar decisiones, mientras que en las colonias de millones de hormigas, las decisiones se desplazan hacia la masa en interacción. Parece que existe una ley general que nos sugiere un

compromiso entre lo complejo que sea el individuo y lo rica que es la diversidad de acciones que puede tomar el colectivo. Los Borg no encajan aquí, y su sociedad diverge notablemente de nuestra idea de cooperación. A diferencia de las hormigas y los Borg, el beneficio colectivo surge entre nosotros (cuando la sociedad funciona) de una búsqueda de la seguridad y bienestar de los individuos.

El colapso social es fruto de dos componentes esenciales y me temo que inevitables. Uno es el que ya hemos citado antes: mantener una sociedad compleja requiere energía, tanto más cuanto mayor es su complejidad. Sin una energía abundante y asequible que permita desplazar y transformar materias primas, sostener la diversidad de productos y de los colectivos que los fabrican y elaboran, la complejidad se hace inviable. Ello resulta todavía más evidente cuando se trata de centros urbanos que acogen a grandes poblaciones, una tendencia que se ha ido acelerando en nuestro planeta desde finales del siglo pasado. Para que las ciudades estén abastecidas y puedan comerciar con otras, es preciso que dispongamos de medios de transporte eficientes y que, de nuevo, requieren energía. El segundo componente clave, menos obvio pero bien definido, es la naturaleza del cambio que, lamentablemente, conlleva cruzar puntos de no retorno. Las crisis que han sellado el declive de muchos antiguos imperios combinan grandes poblaciones humanas, crecimiento insostenible y un clima desfavorable. Y estas combinaciones siguen leyes matemáticas a las que no podemos escapar y que presentan transiciones bruscas.

La idea esencial se recoge en la figura 5.6, en la que se muestran tres tipos de relaciones posibles entre el «estado» de una sociedad (demografía, ausencia de conflictos, igualdad económica) y la magnitud de la perturbación externa (estrés por clima, falta de recursos energéticos). En la figura 5.6a vemos una relación lineal en la que el aumento del estrés asociado al efecto externo hace que se reduzca gradualmente la calidad de la sociedad. En la figura 5.6b vemos un escenario algo más acelerado, con cambios que se hacen más rápidos a medida que aumenta la perturbación. En ambos casos, tenemos una relación causa-efecto más o menos intuitiva, con una sociedad que va pasando sucesivamente y de forma continua por distintos estados que indicamos en la secuencia 1 → 2 → 3. Sin embargo, las evidencias de las que

disponemos y los modelos basados en nuestra economía de crecimiento y con recursos limitados apuntan al esquema de la figura 5.6c: el cambio puede ser moderado al principio 1 → 2, pero la sociedad alcanza un punto de no retorno que la precipita súbitamente a un estado 3, sin pasos intermedios. Podríamos decir que la lógica de la estabilidad social admite, cuando hablamos de sociedades complejas y grandes infraestructuras, dos estados alternativos. En uno, la energía disponible de forma abundante (o un uso racional y sostenible de ésta) permite el mantenimiento del orden social. En el otro, la imposibilidad de mantener los flujos de energía a través del sistema lo llevan a la desaparición.



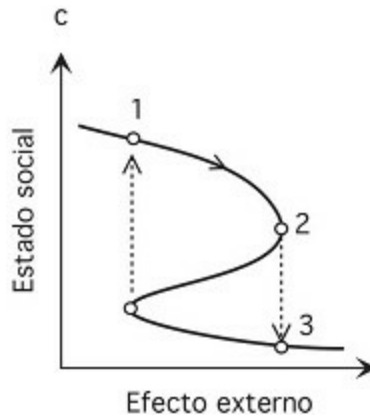


Figura 5.6. Las respuestas de la sociedad a los cambios externos, como la pérdida de recursos energéticos o una demografía excesiva, responden a leyes matemáticas que se alejan de la imagen simple de efectos proporcionales a las causas, como sería la gráfica de la figura (a), en la que el declive de la estabilidad social se va reduciendo gradualmente a medida que crece el efecto externo. En general, las respuestas no son lineales (b) y todo indica que de hecho existen puntos de no retorno (c) que implican la presencia de colapsos súbitos una vez que el efecto externo cruza determinados umbrales críticos.

Segunda oportunidad

Hemos hablado antes de la importancia de la cooperación y de nuestro éxito evolutivo, en el que la planificación y la previsión del futuro han sido esenciales. Nuestra sociedad moderna posee un potencial de acceso a la información como jamás ha existido antes, y existe cierta preocupación, difusa pero creciente, por el futuro del planeta. La presencia de este interés se refleja en la figura 5.7, en la que vemos la frecuencia con la que se halla la expresión *social collapse* en una colección de millones de libros digitalizados y que cubren un periodo de doscientos años, desde 1800 hasta ahora. Se observan dos picos asociados a las grandes guerras y es especialmente interesante comprobar que, después de éstas, la curva sigue teniendo una tendencia creciente. Más allá de nuestros errores en la percepción del peligro, parece claro que la literatura muestra con claridad un registro objetivo de nuestras preocupaciones. Si de algo sirve recoger lo que diversos autores han planteado, de forma más o menos reflexiva, acerca de este problema, la curva ascendente nos puede servir también de advertencia: a medida que pasa el tiempo, crece nuestra incertidumbre, seguramente porque no estamos seguros de qué nos espera.

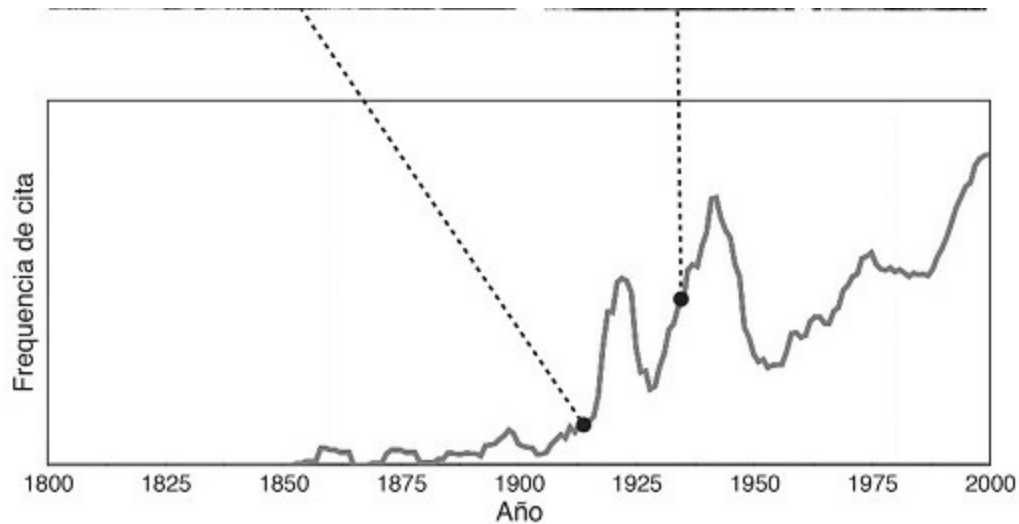


Figura 5.7. Frecuencia de aparición de la expresión *social collapse* (desplome social) en una base de datos de millones de libros digitalizados desde 1800 hasta 2000 (generados empleando la herramienta de Google Ngrams, <https://books.google.com/ngrams>). Los picos que aparecen a principios y mediados del siglo XX se corresponden con las dos grandes guerras mundiales. Después de cierto declive, a partir de los años sesenta su frecuencia no ha dejado de aumentar.

Dotados de neuronas espejo gracias a la evolución, deberíamos ser capaces de impulsar la cooperación hasta sus límites. Deberíamos sacar partido de nuestra extraordinaria posición para predecir el futuro, cambiar nuestros hábitos de consumo y salvar la Tierra. Y de nuevo nos encontramos con el dilema del individuo y su responsabilidad respecto del planeta. Detener el curso del cambio climático requiere un esfuerzo, sin duda, y a cambio tendremos —nos parece— un premio pequeño, imperceptible y que quizá parezca insignificante. Pero no lo es. En la lógica de los estados alternativos que hemos discutido antes, no cabe una visión lineal, en la que pequeños cambios sólo darán lugar a resultados menores. Los refugiados que huyen de guerras que parecían lejanas lo hacen no sólo debido a conflictos étnicos, políticos o religiosos. Y, tal y como los científicos ya habían advertido hace años, las guerras iniciadas por la escasez de agua son tan sólo una de las consecuencias sociales del cambio climático. La pérdida de cosechas y la migración de poblaciones rurales hacia las grandes ciudades son una causa directa, que sólo alimenta la desigualdad y el conflicto. Estas tendencias se mantendrán en el futuro, y desencadenarán nuevas oleadas de seres humanos que intentarán alcanzar un mundo algo más feliz.

El argumento de la novela de Ishiguro, en la que los niños de Hailsham son utilizados como bancos de órganos, nos puede repugnar, sobre todo por la indiferencia o la aceptación que percibimos en la sociedad que los rodea. Pero de nosotros depende evitar que los niños que deberían estar en la escuela soñando con un mundo distinto mueran ahogados en el mar o víctimas de un bombardeo. Nuestras acciones, nuestra capacidad por cambiar la forma de ejercer la política o de gestionar los recursos naturales pueden marcar la diferencia entre un mundo justo y un mundo digno de las peores pesadillas de la ciencia ficción.

6

Sobre gatos y universos

El hacedor de estrellas [...] podía hacer universos con todo tipo de leyes físicas o atributos mentales [...] pero no podía hacer que, por ejemplo, dos más dos fueran cinco.

Olaf Stapledon, *El hacedor de universos*

Si Dios no existe, todo está permitido.

Fiódor Dostoievski,
Los hermanos Karamazov

La cosmología moderna empieza realmente con Darwin y Wallace. A diferencia de sus predecesores, ellos proporcionaron explicaciones para nuestra existencia que rechazaban por completo los agentes sobrenaturales.

Leonard Susskind, *El paisaje cósmico*

Un físico en la basura

Los escritores de ciencia ficción no se han limitado tan sólo a pensar en criaturas extrañas, naves interestelares que exploran planetas extrasolares o civilizaciones avanzadas en los límites del universo. En el abanico de posibilidades que nuestra imaginación puede desarrollar, ¿por qué no pensar todo un universo alternativo? Como ha ocurrido con tantos otros temas que parecían exclusivos de la filosofía, ya sea el origen del universo, la vida o la conciencia, la posibilidad de universos alternativos ha acabado ocupando un lugar importante dentro de la física actual. La posible existencia de múltiples universos ha sido formulada desde distintas perspectivas y con objetivos

diferentes. La mera posibilidad de que existan nos produce verdadero vértigo. ¿Podrían existir universos paralelos en los que no sólo sus habitantes, sino las mismas leyes de la física, fueran distintos?

La literatura ha explotado este filón hasta la saciedad y de todas las formas imaginables. En la mayoría de los casos, un acontecimiento violento como una explosión (no necesariamente nuclear) envía al protagonista a otro universo. Una de mis historias favoritas es *Universo de locos*, de Fredric Brown. Aunque se publicó nada menos que en 1949, no ha perdido su frescura. En esta historia, Keith Winton es un empleado de una editorial que se convierte en la diana de un cohete experimental fallido que termina cayendo sobre nuestro protagonista. Éste aparece, como salido de un sueño, en otro universo en apariencia muy similar al nuestro, con un Nueva York muy similar al real, pero en el que conviven humanos y marcianos y donde por la noche se crea una niebla negra dentro de la cual vagan ladrones y asesinos organizados que se desplazan en grupos empleando bastones de ciego. También existe un álter ego de Winton, parecido pero distinto. Como suele ocurrir en estos casos (aunque con mucho humor), las cosas se complican, todo sale mal y nuestro protagonista tiene que luchar para regresar a su universo. Pero la virtud real de esta historia es colocarnos en situaciones que, aunque extraordinarias e irreales, desconciertan a nuestra mente al situarlas en un escenario que nos resulta familiar.

En su libro *Los propios dioses*, Asimov nos relata el encuentro entre humanos y seres de otro universo regido por leyes distintas. Estos seres poseen cualidades físicas y culturales diferentes de las humanas, y la comunicación entre ambos universos se lleva a cabo a través de experimentos que ponen en peligro la estabilidad de ambos mundos. Asimov nos plantea este riesgo mediante una hábil presentación de lo que los personajes (humanos y no humanos) deducen unos acerca de otros.

En algunos relatos, el viaje hacia otros mundos se realiza a veces a lo largo de la dimensión temporal, gracias a una máquina diseñada para este propósito o debido a pliegues en el espaciotiempo. Así ocurre en uno de los divertidísimos *Diarios de las Estrellas* de Stanislaw Lem, cuando el viajero espacial Ijon Tichy se acerca demasiado a un agujero negro, que distorsiona el tiempo a su alrededor, con lo que el cosmonauta se acaba encontrando con

copias múltiples de sí mismo, procedentes de diversos momentos del futuro o pasado. Mientras la nave se va precipitando hacia el abismo, cada vez que aparece una copia nueva de Tichy, hay que explicarle qué ha ocurrido o que ocurrirá, lo que hace imposible resolver el problema y salvarse. Al final, deben hacer una asamblea para poder organizarse y evitar que la nave sea devorada por el agujero negro. En un tono más trascendente, los astrofísicos de la novela *Contacto*, de Carl Sagan, logran comprender un mensaje de otra civilización gracias al empleo de las matemáticas como único lenguaje universal.

En otras historias en las que se plantean retos acerca de mundos posibles y cómo acceder a éstos, se nos habla de realidades múltiples alternativas relacionadas con el mundo cuántico. Estos relatos y la idea de mundos alternativos no procedían de la simple especulación, sino de algunos resultados científicos acerca de las implicaciones de la teoría cuántica. El interés por el tema fue tan grande que en 1976 la revista estadounidense de ciencia ficción *Analog* publica un artículo titulado «Quantum Physics and reality» en el que se discute acerca de una teoría de la realidad desarrollada dos décadas antes por un físico en busca de un marco conceptual del mundo microscópico libre de paradojas. Una teoría que destaca por su radicalidad y que, como muchas teorías avanzadas a su época, cosechó incompreensión y rechazo. Buena parte de la teoría de la que hablaremos terminó desarrollándose y fue aceptada treinta años después, aunque su creador nunca pudo disfrutar de este éxito.

Uno de los problemas relacionados con la interpretación de la mecánica cuántica surge de la formulación, por parte de Erwin Schrödinger, de una de las paradojas más extrañas de la ciencia. Schrödinger era uno de los padres de esta teoría, a la que contribuyó con la ecuación que lleva su nombre y cuyo impacto ha sido enorme tanto en nuestra comprensión del universo como a la hora de desarrollar un inmenso número de tecnologías. Esta formulación permite explicar tanto la desintegración radiactiva (un fenómeno aleatorio) como las propiedades de los materiales semiconductores, cuyo uso en los transistores dio pie a la revolución de la microelectrónica. La ecuación de Schrödinger se parece a otras ecuaciones bien conocidas en física que describen la propagación de ondas. Su aspecto nos recuerda, de hecho, a una

de estas ecuaciones, que podemos resolver para cada caso dado y encontrar la forma exacta y comportamiento de las ondas en el espacio y el tiempo. Por ejemplo, podemos describir mediante una *ecuación de ondas* cómo se moverá la superficie del agua de un estanque cuando lanzamos una piedra. Cuando Schrödinger formuló su teoría, una de sus fuentes de inspiración era la observación de que las partículas de materia se comportan también como ondas, lo que daba sentido a este tratamiento. Pero ahí se terminan las similitudes. La ecuación de onda cuántica no podía interpretarse como las ondas que nos son familiares. Por el contrario, como descubrió el físico Max Born, las soluciones de esta ecuación nos dan las probabilidades de observar el sistema en distintos estados, pero no de decir exactamente cuáles son esos estados. Lo único que podemos asegurar (y la ecuación de Schrödinger nos permite calcularla con precisión) es la probabilidad de encontrar un estado u otro. El azar surgía, sin previo aviso, de las matemáticas de la mecánica cuántica. Schrödinger estaba molesto con esta interpretación aleatoria del mundo atómico que se desprendía de la mecánica cuántica. Una de sus consecuencias es el principio de incertidumbre de Heisenberg, que afirma que si determinamos la posición de una partícula con gran precisión, entonces no podremos conocer bien su velocidad. Y lo contrario también es cierto: si podemos determinar con precisión a qué velocidad se desplaza, entonces tendremos problemas para conocer su posición.

Schrödinger intentó demostrar la inconsistencia de esta interpretación probabilística mediante el siguiente experimento mental: imaginemos que colocamos un gato en el interior de una caja, que a continuación cerramos. Dentro de esta caja hay un dispositivo que se acciona en el caso de que un átomo radiactivo se desintegre. Si esto ocurre, se libera un gas tóxico que mata al gato. En caso contrario, éste permanece con vida. Cuando abrimos la caja, comprobamos si el gato está vivo (figura 6.1a) o muerto. La intuición nos dice que éste debe ser el estado del gato durante el experimento, pero la teoría cuántica nos dice que el estado del gato sólo puede definirse correctamente cuando se abre la caja y se observa. Antes, lo único cierto es que el gato está en una «superposición de estados» que podríamos definir como «medio vivo, medio muerto». La figura 6.1b nos brinda una representación artística de esta situación. La imagen borrosa nos impide ver

con seguridad el estado del gato, y de hecho la mecánica cuántica nos dice que lo único real es esta superposición de gato muerto ($|\text{gato } M\rangle$) y gato vivo ($|\text{gato } V\rangle$). Este estado se escribe mediante una expresión matemática (véase la figura 6.1b) en la que sumamos a la vez los dos posibles estados. Cuando medimos, nos libramos de esta extraña incertidumbre y determinamos el estado «exacto» del sistema. El gato está —ahora sí— vivo o muerto, sin mezclas ni ambigüedades.

Aunque esta interpretación puede sonar a una completa locura, lo cierto es que hasta hoy todos los experimentos llevados a cabo la apoyan, si bien para nuestra lógica representa un desafío al sentido común. Pero la interpretación también conlleva ciertas hipótesis que se plantearon en los primeros días de la física cuántica, en particular una que ha sido denominada «interpretación de Copenhague»: sólo podemos hablar del estado real del sistema cuando lo medimos. Esta interpretación permitía a los físicos olvidarse de algunos aspectos peculiares del mundo cuántico y su separación del mundo cotidiano al que estamos acostumbrados. Uno de sus mayores defensores era el danés Niels Bohr, gigante entre gigantes, y cuya autoridad era difícil de cuestionar. Esta interpretación coloca al observador en una posición privilegiada, y el enorme éxito que tuvo la teoría para explicar multitud de fenómenos hizo que los físicos olvidaran por completo algunas de sus extrañas implicaciones.

¿Qué salida tenemos ante esta paradoja? El problema no es fácil y las salidas airoas tampoco son fáciles de descubrir. No hay que olvidar que estamos hablando del universo de la microescala y que, aunque no nos guste, la realidad puede no ajustarse a nuestra intuición racional. En este sentido, la naturaleza aleatoria del mundo cuántico parece más que bien establecida, lo que nos obliga, por ejemplo, a poner en duda algunas ideas muy bien establecidas acerca de la causalidad: la naturaleza probabilística del mundo cuántico hace que debemos renunciar, en esta escala, al determinismo. A diferencia de lo que supone la visión clásica del mundo físico, en la que tiene sentido hablar de partículas situadas en un punto y un tiempo precisos del espacio, éste no es el caso del mundo cuántico, en el que se da un no

determinismo del que no hay forma de escapar. El mismo Einstein, irritado por esta situación (y pese a no ser creyente), dijo aquello de que «Dios no juega a los dados».

Uno de los mejores candidatos para abordar el problema planteado es el autor de una de las teorías más fascinantes y controvertidas de la física moderna. La propuesta la planteó el físico Hugh Everett a mediados del siglo xx y es conocida como «teoría de los universos múltiples». Everett era un estudiante de doctorado brillante, que se encontraba por entonces bajo la supervisión del gran John Wheeler, una leyenda de la física del siglo pasado. La extraña naturaleza de las paradojas del mundo cuántico, así como las interpretaciones de otros experimentos clásicos, le resultaban difíciles de aceptar. Para Everett, la interpretación de Copenhague era «una monstruosidad filosófica». Después de una profunda reflexión y dando muestras de una extraordinaria originalidad, logró demostrar que, empleando una versión físicamente consistente de la mecánica cuántica, era posible resolver la paradoja suponiendo que en realidad los dos resultados posibles del experimento tienen lugar al mismo tiempo (el gato vivo y el gato muerto), pero que cada una de estas opciones se da en un universo alternativo.

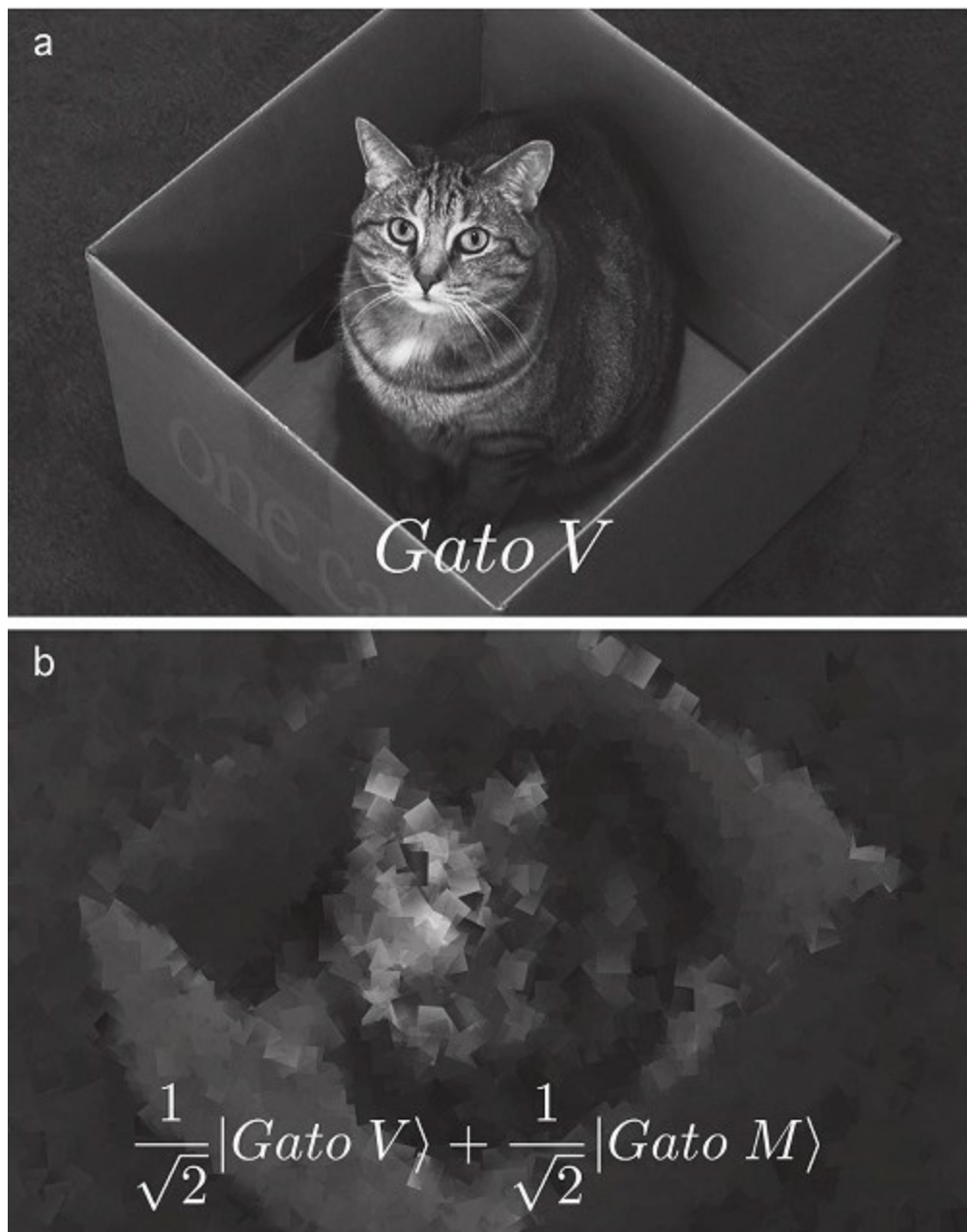


Figura 6.1. La paradoja del gato de Schrödinger. Supongamos que nuestro gato puede estar vivo (V) o muerto (M). En una aproximación «clásica» a la que estamos acostumbrados en nuestro mundo diario, un gato metido en una caja sólo puede estar en uno de estos estados (vivo, por ejemplo). Sin embargo, según la mecánica cuántica, el gato encerrado en la caja y que puede morir si un átomo se desintegra y provoca la emisión de un veneno, se halla en una superposición de dos estados (ni vivo ni muerto, sino ambas cosas a la vez) y sólo al abrir la caja es posible afirmar en qué estado se encuentra.

En la mecánica cuántica de Everett, el mundo micro y el macro están unidos, a diferencia de lo que ocurre en la teoría tradicional. Una de las propiedades poco comunes de la mecánica cuántica es que para explicar

cómo cambian los estados del sistema a lo largo del tiempo se emplea una ecuación (la ecuación de Schrödinger) que es continua en el tiempo, de forma similar a otras de la física, pero que experimenta un «colapso» cuando el sistema es medido. La función de onda del sistema, que podemos imaginar como la suma de muchas ondas superpuestas, cada una de las cuales representa un estado posible, se transforma de manera suave en cada proceso físico. Pero lo extraño ocurre en el momento de la medida por parte del observador (el humano que abre la caja para ver el gato). Medir requiere interferir con el sistema desde el exterior, y esta medida da lugar a la selección de uno de los estados, de tal forma que se rompe con la continuidad de la ecuación de ondas. En su teoría, Everett describe un universo físico en el que el sistema cuántico y el observador forman parte de un todo, con una función de onda común que denominó «función de onda universal». Esta onda obedece la ecuación de Schrödinger y contiene todas las posibilidades del sistema. Cuando se mide, lo que ocurre en realidad es que hay una separación (continua) de las dos componentes (una para cada resultado de la medida) y ambas tienen lugar... cada una en un universo alternativo. En uno, al abrir la caja el observador halla el gato vivo. En el otro, el gato está muerto. La teoría requiere algo difícil de digerir: cada acontecimiento que tiene lugar en el mundo cuántico conlleva un desdoblamiento en dos realidades alternativas. Aunque este hecho conlleva también la creación constante de, virtualmente, innumerables universos, lo interesante es que Everett demuestra que las ecuaciones de la mecánica cuántica explican la forma en la que se comporta el mundo real, sin adoptar elementos adicionales, como ocurría con la interpretación de Copenhague.

La idea de los universos múltiples no tuvo una buena recepción y, en palabras del biógrafo de Everett, Peter Byrne, «cayó inmediatamente en el olvido». El mismo John Wheeler se sentía incómodo ante las implicaciones de la nueva visión que había desarrollado Everett y estaba preocupado por el rechazo que expresó Bohr. Algunos colegas eminentes la consideraron poco menos que algún tipo de «teología». Al fin y al cabo, cada uno de los desdoblamientos implicaba no sólo átomos, sino también gatos, seres humanos... y todo lo demás. Pese a que la teoría no tenía grietas y que no era más extraña que la paradoja que quería resolver, los físicos le dieron la

espalda. Tras algunos intentos de convencer a sus colegas, Everett abandonó el mundo académico y dirigió sus esfuerzos hacia problemas relacionados con diversos proyectos gubernamentales (algunos aún hoy clasificados como secretos), aunque también llevó a cabo estudios teóricos de gran importancia en los que aparecían resultados matemáticos generales sobre problemas de optimización. Pero nunca volvió a ser el mismo. Su familia sufrió su comportamiento ausente durante años, en los que apenas hablaba con sus hijos y solía pasar horas desconectado de los demás fumando y bebiendo. Sólo muchos años después recibió las primeras muestras de interés y admiración por parte de otros físicos que empezaban a apreciar el valor de su trabajo. Pero ya era tarde. Tras décadas de excesos y una sobrecarga de estrés, a los cincuenta y un años sufrió un infarto que lo fulminó. Había dejado escrito en su testamento que deseaba que sus cenizas fueran arrojadas a la basura. Pocos años después, su hija Elisabeth, tras años de vida decadente y problemas con las drogas, se suicidó dejando un mensaje en el que se despedía esperando ir a encontrarse con su padre «en otro universo».

El legado de Everett se une a través de los años a una gran variedad de teorías e hipótesis que han formulado en diversas versiones la idea de los universos múltiples. Si bien estas ideas pueden parecer chocantes, lo cierto es que los físicos que buscan una comprensión de las leyes generales del cosmos consideran la existencia de estos universos una consecuencia inevitable de las leyes físicas establecidas. Y cuando no nos limitamos a observar nuestro mundo, sino que —como hacemos aquí— pensamos en sus alternativas, debemos plantearnos por qué algunas cosas son como son. Por ejemplo, el lector de estas páginas es un ser vivo que está inmerso en un espacio de tres dimensiones. ¿Podría existir un mundo en el que fuera un ser de dos dimensiones o de cuatro?

¿Por qué tres dimensiones?

En la mesa de mi oficina descansa un objeto llegado de otra dimensión (figura 6.2). Bueno, no exactamente. Se trata de una «botella de Klein» de vidrio, que compré hace unos años a Cliff Stoll, un individuo locuaz que las fabrica en Oakland (California), de todas las medidas y formas imaginables.

La botella es realmente peculiar, sobre todo si prestamos un poco de atención a su extraña organización. Tiene un cuello que asciende para dar un giro y entrar a través del cuerpo de la botella de tal modo que, si una mosca caminara desde el interior y saliera en dirección al cuello exterior, terminaría sin dificultad en la otra cara de la botella, lo que nos sugiere que la botella ¡tiene sólo una cara! A los aficionados a los pasatiempos matemáticos este problema les resultará familiar.

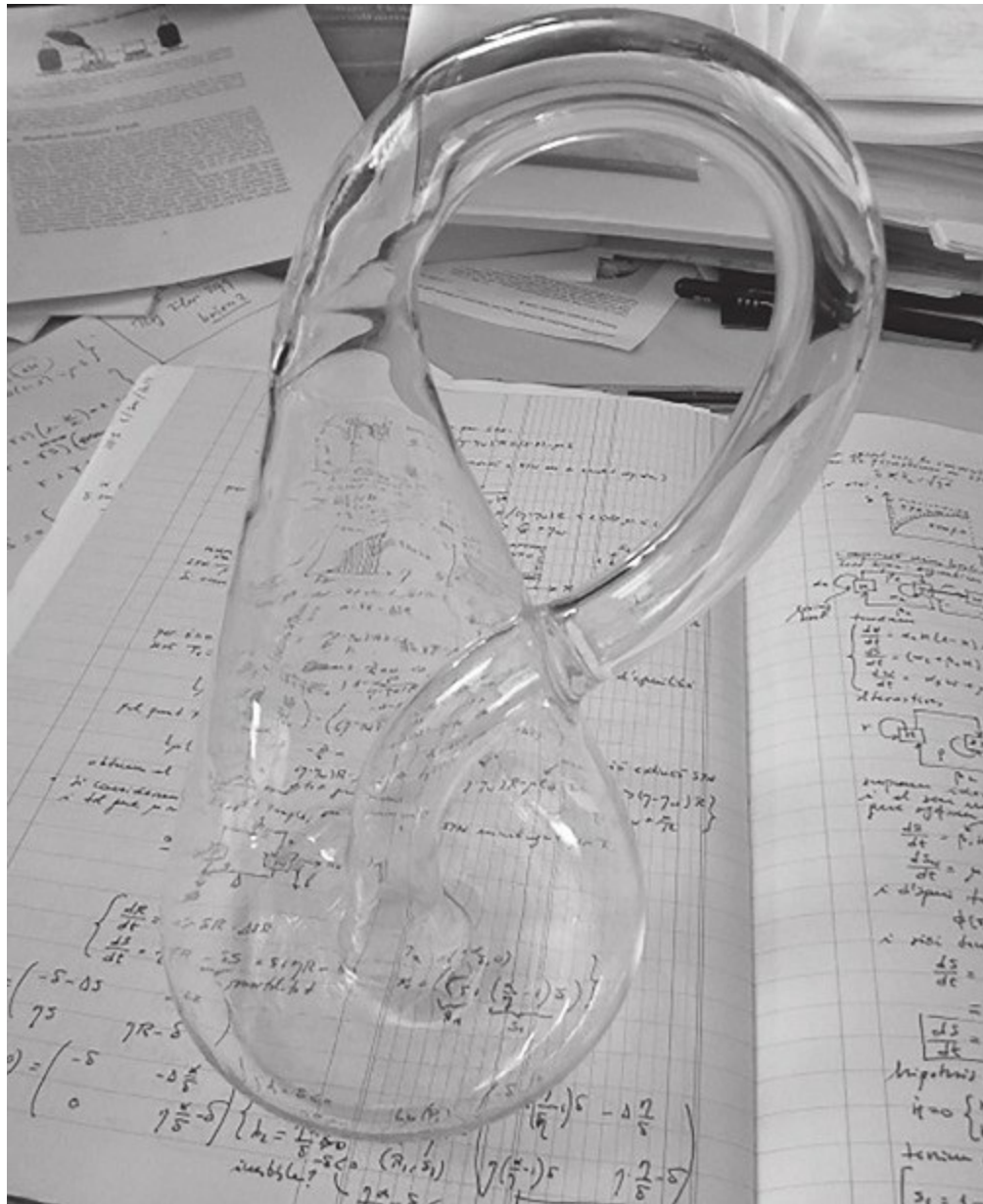


Figura 6.2. Una botella de Klein, tal y como la podemos crear en nuestro universo de tres dimensiones. Aunque en este universo la botella se interseca a sí misma, puede demostrarse que en cuatro dimensiones no lo haría, y que en ese caso posee una sola cara.

A diferencia de la botella de Klein, la denominada banda de Moebius es un tipo de objeto fácil de fabricar en casa con papel, tijera y cola. Sólo necesitamos cortar una cinta de papel y pegar sus extremos, pero girando 180 grados uno de ellos, de forma que la cinta se pliega. Si dibujamos una línea sobre la cinta empezando por cualquier punto, daremos toda la vuelta hasta llegar al otro lado. La cinta sólo posee una cara. La banda de Moebius tiene esta extraordinaria propiedad porque es un objeto plano que puede retorcerse dentro de nuestro espacio tridimensional. ¿Qué ocurriría si quisiéramos hacer lo mismo con un objeto tridimensional? ¿Podemos conseguir que también tenga una sola cara? La botella de Klein nos da una respuesta muy interesante: «sí»... pero con trampa. Aunque es cierto que la mosca puede desplazarse por la superficie de la botella e ir de un lado a otro del cristal andando sobre éste, en realidad la botella no posee una sola cara, dado que necesita intersecarse a sí misma, como vemos en la imagen. Si nos fijamos bien, la botella tiene ciertos «defectos» necesarios para alcanzar —aunque sea parcialmente— el objetivo de la superficie única. Su cuello se retuerce hacia abajo, entrando a través de la botella hasta alcanzar el fondo de ésta. Y aunque nuestro experimento con la mosca es correcto, la verdad es que la necesidad de que la botella se «corte» a sí misma es poco elegante. ¿Es posible que un objeto contenga un volumen y a la vez posea una sola cara sin intersecarse? La respuesta es negativa... en nuestro espacio habitual de tres dimensiones.

Si tuviéramos que dar una lista de las propiedades más básicas de nuestro universo a un extraterrestre, la primera de todas las cosas que pondríamos en ella sería seguramente el número de dimensiones que experimentamos de forma cotidiana: cualquier objeto puede ser localizado con unas coordenadas bien definidas empleando tres números. Además, los acontecimientos que ocurren tienen lugar en una dirección temporal bien definida. Esta cuarta dimensión es el tiempo, del que hablaremos algo más tarde. Puede parecer

obvio que nuestro mundo tenga tres dimensiones, pero aquí queremos cuestionar todo aquello que parece evidente e ir más allá, así que debemos preguntarnos el porqué de nuestro mundo tridimensional.

La literatura de ciencia ficción, nuestra querida aliada a lo largo de estas páginas, también nos ofrece formas de acercarnos al problema de las dimensiones del universo. Una obra muy famosa titulada *Planilandia*, escrita por Edwin Abbott en 1884, presentaba en tono satírico un mundo de dos dimensiones ocupado por seres simples con forma de figuras geométricas. En *Planilandia*, las casas son como los planos de obra de un piso, de modo que los cuadrados, rombos o triángulos que representan a sus ciudadanos deben desplazarse sobre un plano, abriendo y cerrando puertas que son líneas que pueden girar sobre un punto, pero también existen limitaciones, como la de que las líneas que constituyen los límites de casas y habitantes no pueden cruzarse. Dado que somos seres tridimensionales, no nos cuesta imaginar a estos seres deambulando por un pedazo de hoja sobre nuestra mesa. Los contemplamos desde nuestra dimensión extra como una especie de dioses que pueden penetrar en su mundo. Diversos autores han especulado con esta idea y el astrónomo y divulgador Carl Sagan la empleaba para explicar el concepto de dimensiones. Un objeto tridimensional, digamos que una pelota que pasara a través del mundo plano (figura 6.3), sería «visto» como un círculo que iría aumentando de tamaño para después reducirse hasta desaparecer. Los planilandios habrían visto una especie de milagro difícil de interpretar. Sólo si pudieran concebir el concepto de dimensión y sus posibilidades podrían comprender lo que ha ocurrido.

Nosotros podríamos llevar a cabo todo tipo de experimentos que desconcertarían a nuestros sufridos ciudadanos planos. Por ejemplo, un cuadrado que se encontrara en una habitación cerrada podría desaparecer repentinamente para reaparecer en el exterior de la habitación sin abrir la puerta. Este milagro puede darse cuando somos nosotros los que desplazamos (con cuidado) al cuadrado y lo sacamos de su universo plano moviéndolo en la tercera dimensión para colocarlo en su destino final. La dimensión extra da lugar a un fenómeno inexplicable para los que viven en el universo de dos dimensiones, aunque tal vez alguno de sus físicos podría haber desarrollado una teoría al respecto. Y aún hay más: dado que podemos girar a nuestro

objeto plano dentro del espacio tridimensional, al devolverlo a su mundo puede haber ocurrido que hayamos invertido su simetría. Si nuestro planilandio fuera una moneda (o su dibujo), al devolverlo a su mundo podría ocurrir que se hubiera convertido en su imagen especular. Esta idea se ilustra en la parte inferior de la figura 6.3. Tomamos la moneda que sólo posee una cara (cabe imaginar una moneda transparente), la sacamos del plano y después la giramos. Esta operación no es posible en las dos dimensiones iniciales, pero permite que, al devolverla, se haya creado una imagen especular de ésta.

Podríamos hacer algo parecido con nosotros, seres tridimensionales, y un ser procedente de la cuarta dimensión. ¿Cómo veríamos a este ser cuando atravesara nuestro mundo tridimensional? En el caso de la esfera, los ciudadanos del país plano observarían un objeto parecido a ellos pero de forma cambiante y que podría aparecer y desaparecer al atravesar su mundo. Nuestro visitante, si pudiera atravesar el espacio que nos rodea, aparecería también como una inquietante forma, al principio diminuta, y luego se expandiría para, finalmente, desaparecer. Si se tratara de una hiperesfera (el equivalente de la esfera en cuatro dimensiones) veríamos ante nosotros una esfera que crecería en radio desde cero para luego contraerse hasta esfumarse. Y si se tratara de un «ser» tetradimensional, observaríamos probablemente una secuencia de lo más extraña (por no decir aterradora) de la visita. Si llevara consigo en la mano una botella de Klein, tal vez podríamos verla desplegarse ante nosotros sin atravesarse a sí misma, antes de desaparecer. Tal y como señala el matemático Clifford Pickover, los seres de la cuarta dimensión podrían hacer operaciones sobre los seres tridimensionales sin necesidad de atravesar su piel. En la figura 6.4 vemos un famoso grabado de Andrés Vesalio en el que se representan los vasos sanguíneos de todo nuestro cuerpo. Para nuestro visitante, esta red de vasos sería perfectamente accesible, ya que la dimensión adicional permitiría llegar a cualquier vena o arteria sin cruzarse con nada.

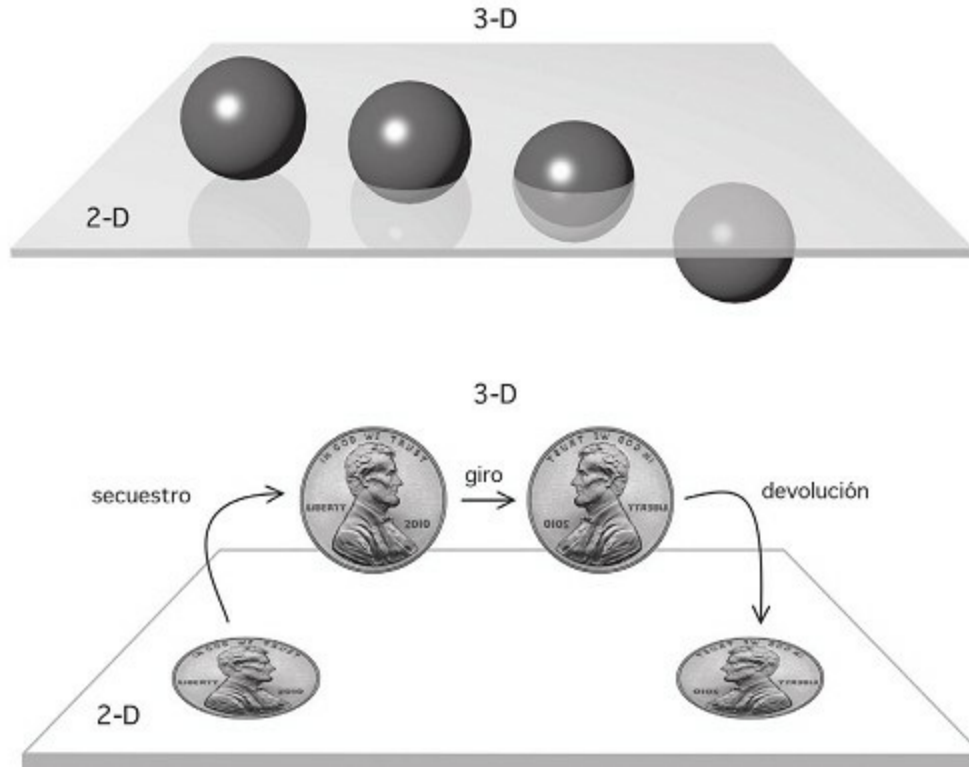


Figura 6.3. El mundo tridimensional se cruza con Planilandia. En la figura de arriba vemos cómo una esfera atraviesa el mundo bidimensional, en el que sus habitantes «verían» un círculo que iría creciendo para después decrecer y desaparecer (secuencia de izquierda a derecha). Un viaje de ida y vuelta desde el universo plano puede dar lugar a situaciones extrañas. Si imaginamos una moneda transparente (con la cara de Lincoln, por ejemplo) y la secuestramos para devolverla después de hacer un giro en el espacio tridimensional, la moneda que devolvemos está del revés.

¿Y qué ocurriría con nosotros si pudiéramos situarnos —como el cuadrado plano que volaba en tres dimensiones— en la cuarta dimensión? Es muy posible que tuviéramos problemas graves: dejaríamos de tener, como el cuadrado, una superficie bien definida con un «dentro» y un «fuera», por lo que es probable que nuestro organismo sufriera transformaciones poco deseables, como que nos diéramos «la vuelta» y nuestro interior se convirtiera en el exterior. Sé que no es fácil imaginarlo, pero sospecho que compartimos la misma sensación de horror. ¿Podría ocurrir? En algunos programas de televisión en los que los pobres mayas o los egipcios son considerados pueblos estúpidos incapaces de construir pirámides sin la ayuda de visitantes extraterrestres, se suele sugerir (quién sabe por qué) que estos arquitectos espaciales proceden «de la cuarta dimensión». Ha llegado la hora de acabar con ellos.

En física existen diversas leyes fundamentales que nos permiten explicar el comportamiento de sistemas tan diversos como la caída de una piedra o la formación del sistema solar. Las mismas leyes nos han permitido también enviar sondas para explorar la superficie de Marte o posarse sobre un cometa a millones de kilómetros de distancia. Debemos estas hazañas a una ingeniería muy avanzada y a una de las teorías más poderosas y mejor establecidas que existen: la teoría de Newton sobre la gravitación. Aunque la tecnología espacial, los ordenadores y la ingeniería han alcanzado niveles de desarrollo extraordinarios, resulta sorprendente que el marco teórico de Newton haya resistido tan bien el paso de los siglos. Una de las aplicaciones más corrientes es el cálculo de las órbitas de los objetos diversos que giran alrededor de nuestro Sol. Además de las órbitas planetarias o de los cometas más famosos, disponemos de métodos de observación de gran precisión que han logrado establecer las trayectorias de miles de objetos, grandes y pequeños, situados en algunos casos mucho más allá de los límites de nuestro sistema. Así, bajo el efecto de la atracción gravitatoria, la Luna mantiene su danza regular alrededor de nuestro mundo, y lo mismo ocurre en otros planetas, dotados de una, dos o decenas de lunas. Como ocurre en la mayoría de los ejemplos históricos, el camino hacia una teoría general pasa por comprender los casos más simples pero no menos importantes. El triunfo más señalado es el cálculo de la órbita de un planeta alrededor de su estrella, suponiendo que sólo consideramos estos dos objetos. Este «problema de los dos cuerpos» es uno de los mejor conocidos por cualquier estudiante de física y uno de los ejemplos elegantes de cómo las leyes físicas permiten predecir el comportamiento de los cuerpos celestes. ¿Qué aprendemos de este problema?

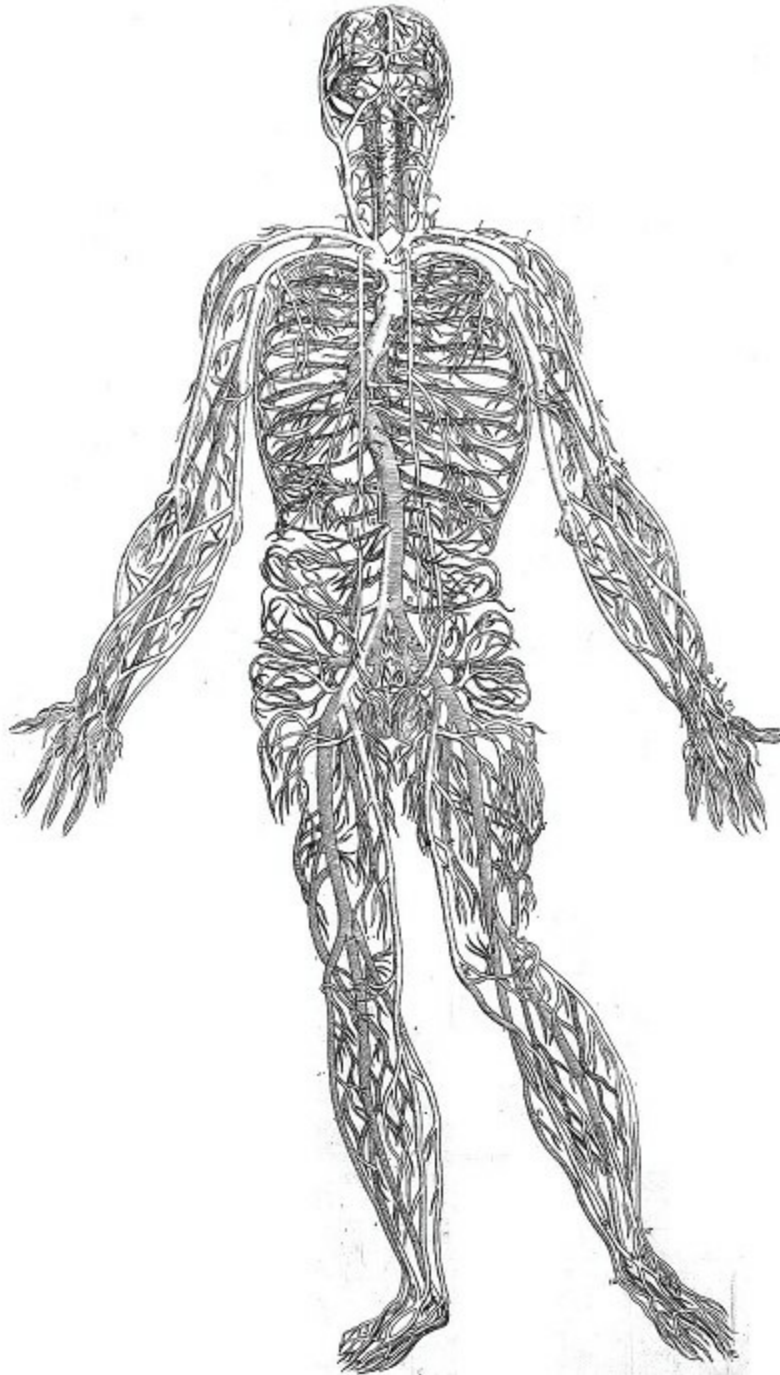


Figura 6.4. Grabado de Vesalio sobre los vasos sanguíneos del cuerpo humano. Para un cirujano de nuestra dimensión, operar este cuerpo requiere cortar su superficie. Para un cirujano del universo tetradimensional, no sería preciso: podría llegar a cualquier zona sin cortar tejido alguno.

Supongamos que estamos en el universo familiar de tres dimensiones, en el que dos objetos dotados de masa se atraen entre sí siguiendo la ley de Newton de la gravitación. Dependiendo de las condiciones iniciales (dónde se

encuentran al principio ambos cuerpos y sus velocidades) existen varias soluciones para las órbitas que poseerá el planeta alrededor de su sol. La idea es que sobre el papel o en un ordenador que simula este pequeño sistema, colocamos los dos cuerpos en dos puntos del espacio, les damos a cada uno cierta velocidad inicial y dejamos que se muevan bajo la acción de su atracción mutua. El resultado más interesante es la existencia de órbitas estables: para ciertas condiciones muy generales, nuestro sistema terminará llevando a cabo una danza ordenada, regular y predecible. Tan predecible que podemos calcular con enorme precisión dónde se encontrarán los componentes del par en cualquier momento del futuro. La ley que permite hacer este cálculo establece que la fuerza de atracción entre los objetos depende directamente del producto de sus masas y —lo más importante para nuestra discusión— decrece inversamente con el cuadrado de su distancia de separación. Por tanto, si nuestros objetos están separados por 10 unidades de distancia (de la unidad que elijamos), la fuerza quedará reducida en un factor $10^2 = 10 \times 10 = 100$. Si la separación es de 100 unidades, el factor será ahora de $100^2 = 100 \times 100 = 10.000$; y en general la fuerza se reduce con enorme rapidez.

Parece razonable suponer que algo semejante ocurriría si nos encontráramos en un universo bidimensional o en uno de cuatro o más dimensiones. Pero no es así. Se puede demostrar que en estos casos los efectos de la ley de gravitación serían bien distintos: en el primer caso, la física de Planilandia funcionaría con una ley de la gravedad en la que la fuerza de atracción se debilitaría con mayor lentitud, concretamente con el inverso de la distancia. En cambio, en un mundo de cuatro dimensiones, la fuerza de atracción entre los cuerpos decrecería mucho más rápidamente que en nuestro mundo: nada menos que con el cubo de la distancia, en lugar del cuadrado. Y como efecto de estas diferencias, como descubrió en 1917 Paul Ehrenfest, la gravedad de un mundo plano no sería capaz de permitir la atracción entre cuerpos, y en el de cuatro dimensiones ninguna órbita podría ser estable.

El físico Max Tegmark ha resumido todas estas posibilidades (y algunas más) en un diagrama muy útil para clasificar los tipos de universo esperable en función del número de dimensiones de espacio y tiempo. Este diagrama

(figura 6.5) nos muestra un universo posible (cuadrado negro) capaz de albergar sistemas vivos habitados por individuos capaces de observar este universo. Ésta es la única isla de estabilidad posible, permitida para una combinación de tres dimensiones espaciales y una temporal.

Ya hemos mencionado el porqué de tres dimensiones espaciales. ¿Y qué hay del tiempo? Este problema ha sido objeto de constante discusión entre científicos y filósofos. El tiempo parece una clara desviación respecto de las dimensiones espaciales a las que estamos bien habituados, dado que posee una peculiaridad fundamental, y es su dirección. A medida que envejecemos, nos vemos cambiar en el espejo día tras día, mientras que lo contrario (que fuéramos, como Benjamin Button, cada vez más jóvenes) no ocurre jamás. Esta dirección preferente es la responsable de que podamos distinguir sin dificultad si una escena de una película tiene lugar en la dirección «natural» o en la contraria. Un nadador que se lanza a la piscina desde un trampolín no nos evoca nada especial, pero un nadador saliendo de repente de la piscina y volviendo al trampolín mientras el agua recupera su superficie en calma nos resulta claramente inverosímil. Y no menos extraño parece hablar de distintas dimensiones de tiempo, de forma similar a la mención de varias dimensiones espaciales. Pero lo cierto es que matemáticamente podemos introducir en las ecuaciones de una física alternativa diversas dimensiones temporales y obtener una teoría consistente, que nos sirve para comprobar que estas dimensiones temporales extra darían lugar a un sistema donde las partículas elementales serían menos estables y nuestra capacidad de predecir se iría al traste. En nuestro universo unitemporal cada condición inicial (de qué punto e instante partimos) determina de forma única lo que nuestro sistema hará en el futuro. En un universo con varias direcciones temporales, esta unicidad no es posible. Si en alguna medida fuera permitida la evolución de los seres vivos, su complejidad se vería seriamente limitada por la imposibilidad de desarrollar formas de predecir el futuro. No debemos olvidar que nuestro éxito como especie (como señalábamos en el capítulo 5) tiene mucho que ver con nuestra capacidad de reducir la incertidumbre de lo que nos espera. A partir de las leyes de una física con un tiempo único podemos esperar la

selección de un cerebro capaz de predecir de manera segura. He aquí una conexión profunda entre la física de lo posible y la evolución darwiniana. Y lo mismo puede que ocurra con el universo en su totalidad.

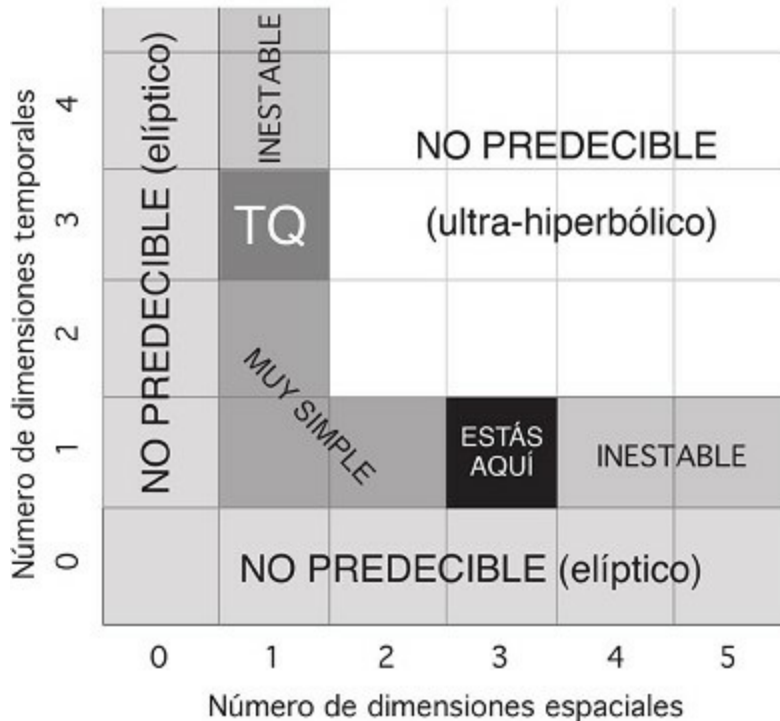


Figura 6.5. Universos posibles en función del número de dimensiones espaciales y temporales. En este diagrama sólo existe un lugar, definido por tres dimensiones de espacio y una de tiempo, en el que encontramos las condiciones de estabilidad y causalidad adecuadas para sostener sistemas vivos y, en particular, a seres capaces de preguntarse por el universo y sus leyes.

El universo darwiniano

Una de las teorías más complejas que los físicos emplean para abordar las preguntas fundamentales sobre la naturaleza del universo es la llamada teoría de cuerdas. En esta teoría, se sustituyen las partículas elementales por una clase distinta de entidades que podemos imaginar como pequeñas cuerdas que, como las cuerdas de un violín, sólo pueden vibrar en ciertas frecuencias. Esta teoría es de una dificultad matemática enorme, y su objetivo final es el de permitir la unificación de todas las fuerzas conocidas en una sola. Pero la ambición de los físicos es aún mayor. La física ha sido capaz de dar sentido a una variedad increíblemente amplia de fenómenos bajo el paraguas de unas

pocas ecuaciones de una elegancia extraordinaria. Sin embargo, nuestra ambición no puede detenerse aquí. ¿Por qué observamos ciertas leyes y no otras? ¿Por qué la masa de ciertas partículas es la que observamos y no otra? En la sección anterior hemos aludido al hecho de que un universo habitado por criaturas complejas sólo puede darse si habitamos un espacio tridimensional y nuestra mente fluye a través de una única dimensión de tiempo. Pero hay más. Si estudiamos el efecto de cambiar algunas de las propiedades básicas de la materia o sus interacciones, ya sean la constante de gravitación que aparece en la ley de Newton o la masa de las partículas fundamentales, nos encontraremos de frente con un problema: pequeños cambios dan lugar a universos inestables en los que por un motivo u otro la vida no podría surgir. Ésta es una de las muchas dificultades con las que se ha enfrentado la teoría de cuerdas, ya que de hecho se trata de un número inmenso de teorías posibles compatibles con universos posibles, la inmensa mayoría de los cuales son distintos del nuestro. En estos universos con unas leyes físicas distintas no encontraríamos, probablemente, formas de vida complejas. El argumento empleado por sus defensores es (de forma muy simplificada) razonable aunque de alguna manera menos satisfactorio de lo que desearíamos. El llamado Principio Antrópico nos dice que nosotros nos hallamos en uno de los improbables universos en los que una mente consciente es posible, mientras que en el resto simplemente no hay nadie que pueda observar. De este modo, el motivo esencial de por qué nuestro universo, el universo en el que habitamos, es aparentemente especial es porque nosotros estamos aquí.

Podemos explorar este problema desde varias perspectivas que no necesariamente requieren recurrir a la teoría de cuerdas. Si consideramos el problema empleando una aproximación más clásica, cabe hallar también evidencia de límites que de algún modo restringen el espacio de posibilidades que permiten la aparición de universos compatibles con la presencia de observadores. La trayectoria particular que ha seguido nuestro universo forma parte de un conjunto de condiciones que, partiendo del Big Bang, permanecen en una región alejada tanto de una expansión demasiado rápida como de un escenario en el que la evolución estelar no es posible. En la figura 6.6 vemos en la parte superior algunos ejemplos (idealizados) de

universos en los que la materia se ha acabado agregando de formas diversas. Algunos contienen galaxias y estrellas que han podido madurar para albergar sistemas planetarios y, tal vez, vida compleja. Otros están vacíos o han quemado su combustible con demasiada rapidez. Ambas posibilidades rodean el espacio favorable a universos parecidos al nuestro, como se indica en la figura, en la que tenemos dos ejes que definen el espacio y el tiempo asociado a la expansión, partiendo del origen de coordenadas. En el lado derecho, cuando la expansión tiene lugar con excesiva rapidez, la materia no tendrá posibilidades de agregarse formando galaxias ni las estrellas de condensarse. En el lado izquierdo, el proceso de expansión es demasiado lento y terminará en un colapso (el llamado *big crunch*). En definitiva, el balance entre la energía asociada a la expansión y la gravedad establece las fronteras de nuestro problema. Si aceptamos que constantemente se crean universos (como sugieren las teorías actuales), tendríamos en cierto sentido un principio de selección que decide las condiciones bajo las cuales estos universos albergarán vida. ¿Podríamos tal vez ir más allá y definir una teoría evolutiva de los universos posibles? Para ello necesitamos incorporar los elementos necesarios para obtener una teoría darwiniana.

El físico Lee Smolin (figura 6.7a), que entre otras cosas fue uno de los pioneros de la llamada teoría cuántica de bucles (una alternativa a la teoría de cuerdas), planteó una posibilidad muy distinta, basada en lo que podríamos denominar un principio de selección natural cosmológico. Este proceso haría de nuestro universo —y tal vez de nosotros mismos— la regla en lugar de una simple posibilidad entre muchas otras. Una teoría evolutiva del cosmos requiere no sólo selección, sino también una fuente potencial de variación y un mecanismo de reproducción. El primer ingrediente es una idea que ya manejó en su momento John Wheeler y que Smolin incorpora en su teoría. Esta idea sugiere que los agujeros negros son las semillas que pueden dar lugar a nuevos universos.

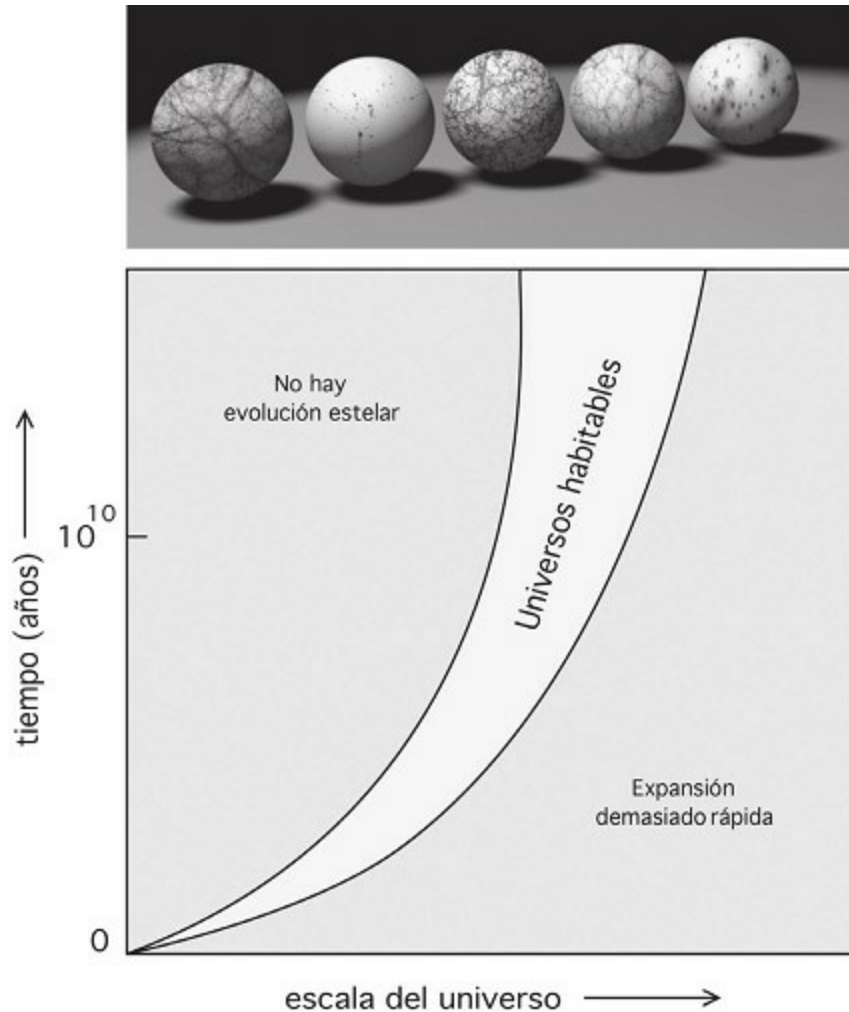


Figura 6.6. Diversas trayectorias de evolución dan lugar a diversos universos (idealmente representados por las esferas de la figura de arriba) con distribuciones de materia de distinta complejidad e incluso sin materia estable. La velocidad de expansión puede ser determinante para permitir un universo como el nuestro, que estaría situado dentro de la banda blanca de universos habitables. Fuera de estas condiciones, el universo podría colapsar o expandirse con demasiada rapidez e impedir la formación de estrellas y galaxias.

Los agujeros negros (figura 6.7b) son probablemente las estructuras físicas más singulares del universo, y lo son de forma literal. Estos objetos proceden del colapso de grandes estrellas que, al final de su vida, no pueden mantener el equilibrio entre la energía generada en su interior y la presión hacia ese mismo interior ejercida por la gravedad. Cuando el combustible se agota, la gravedad gana la partida y, para una estrella lo suficientemente grande, se produce un colapso que genera un sistema gravitatorio con una densidad interior que tiende a infinito (lo que los matemáticos denominan una

singularidad). La teoría sugiere una posibilidad muy interesante, y es que el colapso se produce hasta alcanzar una densidad crítica a partir de la cual se produce una expansión que puede dar lugar a un universo, que poseerá (con pequeñas variaciones) la misma física de la que procede. Y aquí es donde Smolin presenta su conjetura: dado que la física del universo recién nacido conserva (hereda) la física del agujero negro, tenemos el elemento necesario para establecer una cosmología darwiniana. La cantidad de agujeros negros que pueden darse en un universo determinado depende de los parámetros físicos de este universo. Pero dado que esta abundancia determina con qué frecuencia aparecerán más universos, la conclusión es elegante: aquellos universos que permitan crear más agujeros negros se verán favorecidos por la selección, dado que dejan más universos «descendientes». Aquellos que tengan parámetros que den pocos agujeros negros serán menos eficientes y por lo tanto no serán seleccionados. Esta selección nos lleva a una situación bien distinta de la que plantean las teorías de cuerdas: a lo largo de la evolución cosmológica, los universos similares al nuestro, en el que hay abundancia de agujeros negros, se verán favorecidos y dominarán el espacio de lo posible. Desde esta alternativa, debemos esperar observar un universo similar al que nos es familiar y —más interesante aún— debemos esperar que haya observadores.

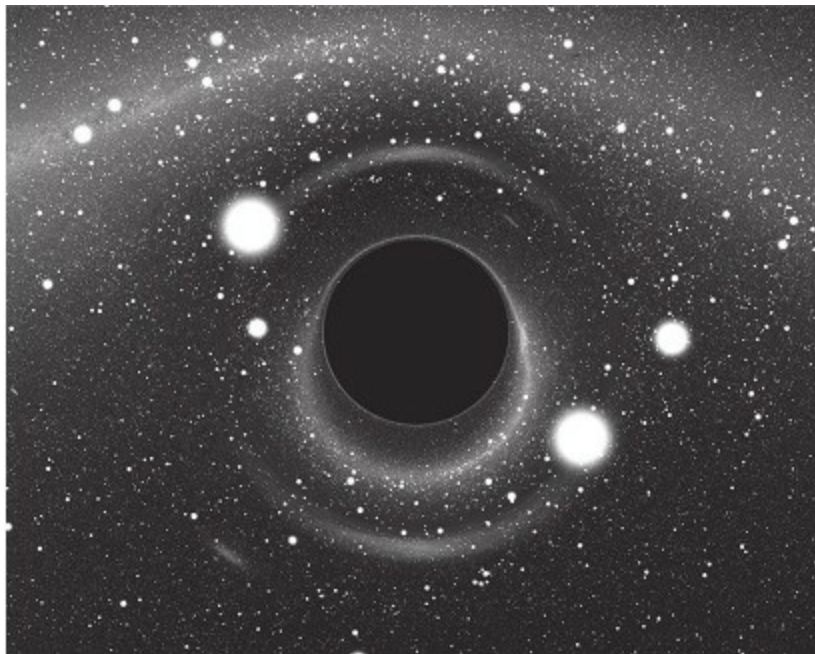
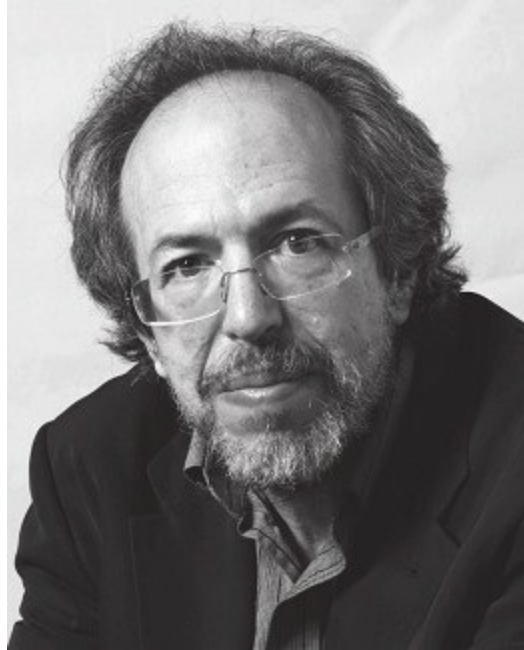


Figura 6.7. El físico Lee Smolin, del Perimeter Institute en Canadá, ha propuesto una teoría de evolución cósmica basada en la selección de universos en los que se optimiza la abundancia de agujeros negros (abajo, imagen de Alain Riazuelo, NASA). En esta teoría cosmológica darwiniana, la selección daría lugar a universos parecidos a los nuestros.

La teoría de Smolin da una vuelta de tuerca fascinante al problema de por qué nuestro universo está dotado de ciertas propiedades y no de otras. Si fuera cierta, el problema de las constantes «especiales» dejaría de existir. No

viviríamos en un universo extraño e improbable, rodeados de universos exóticos y carentes de complejidad. Por el contrario, formaríamos parte de lo esperable. Uno de los atractivos de este modelo es que puede ser testado a partir de los datos que se van obteniendo a medida que avanzamos en el conocimiento del cosmos. Sus predicciones podrán ser verificadas, lo que permitirá en el futuro saber si somos un accidente en el mar de posibilidades cósmico o por el contrario representamos la consecuencia natural de los principios básicos de la evolución planteados por Darwin. Lo que es seguro es que éste nunca habría imaginado que su teoría pudiera unir el destino de las especies con el de las estrellas.

Tierras imaginadas

Hace años, durante una visita a una librería en Milán, compré un volumen ilustrado titulado *Il Libro delle Terre*, de Guillaume Duprat. Es una obra realmente deliciosa, en la que se explican distintas mitologías acerca de nuestro mundo y —sobre todo— de su forma, sus dimensiones y sobre qué se encuentra apoyado. La mayoría de visiones son primitivas y eso hace que el mundo sea plano en muchos casos. Para algunos pueblos, como los fon de Benín, la Tierra descansa sobre una enorme serpiente que se alimenta de unos monos rojos que trepan por ella. Cuando la serpiente se mueve, se producen los terremotos. En un alarde de amor por la inestabilidad, un pueblo de Indonesia —los minangkabaus— sitúa la Tierra sobre los cuernos de un toro que se encuentra apoyado sobre un huevo que a su vez se apoya sobre un pez gigante. Sí, yo también contengo el aliento. Por su parte, los pigmeos imaginan que bajo nuestro mundo hay muchos otros superpuestos. Algunos pueblos esquimales creen que, bajo la superficie terrestre, se encuentra otro mundo en el que las almas de los animales viven en armonía con las de sus cazadores. Hay tierras cuadradas, circulares, poligonales, metidas en baúles inmensos, con una montaña que llora en su centro. Las hay como esferas, algunas huecas, otras con otro mundo en su interior o una sima en su polo.

Si nos liberamos de las reglas del mundo real, lo imposible se abre camino, especialmente cuando aquello que deseamos conocer permanece oculto a nuestra percepción e inaccesible incluso a los exploradores más

osados. No me cabe ninguna duda de que para cada una de estas imágenes del mundo hubo rebeldes que debieron de preguntarse acerca de lo que habría debajo del pez de los minangkabaus, o de dónde procedían los monos que se comía la serpiente de los fon o cómo —si nadie había llegado hasta allí— podía saberse nada acerca de los polos. Algunos de los que se formularon las preguntas debieron de enfrentarse a las autoridades de su época, basadas demasiado a menudo en dioses invisibles, tan alejados de la realidad como los mundos absurdos que debían dominar. No me cabe duda tampoco de que estas historias y otras que han traído hasta nosotros algunos de los mitos más comunes, así como los libros que las han apoyado en distintas culturas, poseen algunos elementos interesantes. Pero lo cierto es que ninguno de ellos, ni remotamente, es capaz de inspirar el asombro y la humildad ante el universo que trae consigo la ciencia. Sentimos vértigo ante el cielo nocturno cuando sabemos que detrás del telón oscuro en el que brillan algunos miles de estrellas hay trillones de ellas cuya luz no podemos percibir, pero sí observar con nuestros instrumentos. Lo sentimos al saber que muchas de estas estrellas ya no están y que la luz que nos llega procede de un fantasma que tal vez haya estallado o que se haya convertido en un agujero negro. En ambos casos, su desaparición dará lugar a nuevos procesos de generación de elementos que servirán de base a otros mundos.

Nos sentimos pequeños al saber que una de esas luces un tanto difusas que se conoció durante mucho tiempo como la nebulosa de Andrómeda es en realidad una galaxia como la nuestra, un «universo isla» que se acerca a gran velocidad hacia nosotros y que, mucho después de que hayamos desaparecido, colisionará con la Vía Láctea. Ignoro si alguna vez podremos conectar con uno de esos universos alternativos que la física nos indica que deben existir. Pero aquí estamos, con estos cerebros extraordinarios que miran hacia el cosmos que nos rodea, y que poseen en su interior todo un universo potencial de pensamientos, ideas y preguntas. Nuestra imagen del cosmos y del universo, y también la pregunta de por qué estamos aquí, ha ido tomando forma a lo largo de cientos de años gracias a aquellos que no se conformaron con verdades reveladas ni dioses invisibles. La han esculpido generaciones de pensadores, la luz de muchos de los cuales se apagó hace

tiempo pero que —al igual que las estrellas ya desaparecidas— han dejado su huella en la tarea colectiva que representa comprender el cosmos y las leyes que lo han hecho posible.

Desde el abismo oscuro

En algún lugar entre el azar y el misterio se desliza la imaginación.

Luis Buñuel, *Mi último suspiro*

La reivindicación última de la creatividad artificial sería un programa capaz de generar ideas nuevas que nos dejaran perplejos o incluso nos repugnarán [...] pero estamos aún muy lejos de ello.

Margaret Boden,
«Creativity and Artificial Intelligence»

La creatividad y la patología de la mente humana son, al fin y al cabo, dos lados de la misma moneda, acuñada por la evolución. La primera es responsable del esplendor de las catedrales. La segunda, de las gárgolas que las decoran, recordándonos que el mundo está lleno de monstruos.

Arthur Koestler, *El espíritu de la máquina*

Crear, dormir..., tal vez soñar

Durante el largo interrogatorio al que es sometido, el protagonista de la serie de televisión *True Detective*, el detective Rust Cohle, rememora los acontecimientos que habían tenido lugar una década antes, cuando él y su compañero de andanzas resuelven una serie de crímenes espantosos en los que se hallan implicados algunos personajes salidos de la peor de las pesadillas. En un momento dado, señala a los policías que lo interrogan que, «como en muchos sueños, hay un monstruo al final». El monstruo al que se refiere Cohle es a la vez uno de los elementos más comunes de la creación literaria y —por desgracia— también del mundo real. Existe el monstruo que deseáramos que sólo fuera posible en los libros o las películas. El monstruo

de la ficción, los fantasmas indefinidos que acechan en la oscuridad o el miedo a la muerte son elementos comunes en toda la literatura y es curioso que, dado lo incómodo o inquietante que resulta sumergirse en estas historias habitadas por entidades malignas, su presencia sea uno de los secretos del éxito de la mayoría de las grandes obras literarias. El asesino que recorre los escenarios de «Los crímenes de la Rue Morgue», de Edgar Allan Poe, los fantasmas que aleccionan a Scrooge en el «Cuento de Navidad», de Charles Dickens, o las sombras inmensas e intangibles de las obras de H.P. Lovecraft. ¿Cuál es la motivación última de esta atracción?

El escritor Antonio Muñoz Molina afirma que «escuchamos historias de ficción no para escapar del tedio de la vida real sino por la necesidad instintiva de comprenderla y ordenarla». Y la neurociencia parece apoyar esta idea, basada en algo fundamental que necesitaremos tener muy en cuenta: nuestros orígenes evolutivos. El miedo ha sido una parte esencial de nuestra evolución. El miedo, y la descarga de adrenalina que conlleva, sirve para que nos detengamos ante un riesgo que puede ser letal, como un depredador al acecho. Esta misma adrenalina nos produce hoy una sensación de placer mientras leemos un cuento o vemos una película de terror que podemos disfrutar gracias al control de nuestro cerebro evolucionado: sin riesgo; el miedo es además una emoción que consolida con mayor facilidad los recuerdos.

Aunque a lo largo de estas páginas hemos intentado reflexionar sobre todo aquello que podemos imaginar, sobre lo posible y lo imposible, no deberíamos terminar sin explorar aquel dominio que parece desafiar la existencia misma de los límites: el proceso de creación. El desarrollo de nuevas ideas o estilos, ya sea en el arte, la ciencia, la literatura, la ingeniería o las matemáticas, requiere una combinación de dos componentes al parecer esenciales. Uno es estar dotado de conocimientos más o menos extensos y sobre todo haber invertido tiempo más que suficiente para prepararse de forma adecuada para afrontar el problema que se desea resolver, la novela que se quiere escribir o el cuadro que queremos pintar. En ciencia, la formulación adecuada de la pregunta es especialmente importante. Pero para decir algo realmente nuevo, para sorprendernos con una historia o un cuadro impactante, para comprender el origen de una regularidad de la naturaleza,

para escribir una canción o un poema que nos conmuevan, para encontrar el atajo antes impensado para resolver un desafío tecnológico o para hallar la demostración de una conjetura sobre números primos, hay que ir más lejos de lo que otros han logrado alcanzar.

Para crear una historia que nos conmueva o nos sorprenda, el narrador debe ser capaz de construir una trama y unos protagonistas creíbles, aunque ni quien escribe ni su recorrido vital tengan nada que ver con la ficción. Por otra parte, el cerebro del artista que inventa un nuevo estilo, en el que la percepción real del mundo puede ser reemplazada por una forma alternativa de interpretarlo, es consecuencia de la evolución de la mente. Como ya hemos mencionado en el capítulo 3, nuestro cerebro ha evolucionado de forma rápida en los últimos dos millones de años, adquiriendo una capacidad extraordinaria para aprender y adaptarse con rapidez, además de para representar de forma simbólica no sólo el mundo y su contenido, sino también la mente de los demás y la suya propia. Pero este recorrido hacia la mente compleja está marcado también por los cambios experimentados por nuestros antecesores, no sólo los primates más próximos a nuestra rama evolutiva, sino también las especies que nos precedieron mucho antes de la aparición de los primates y cuya existencia requería sobrevivir a los depredadores y otras incertidumbres. Desconfiar y reaccionar ante una sombra poco definida sirvió entonces para prevenirnos de un posible peligro. La misma ambigüedad que busca el artista al dejar sin definir los contornos de una imagen puede provocar en nosotros una inquietud que es, en parte, la herencia de aquella respuesta primitiva. El ser humano que se ha ido esculpiendo en estos millones de años se ha liberado de muchas de las limitaciones del cerebro de los reptiles, pero las emociones persisten, atenuadas o amplificadas por la compleja red de conexiones de nuestro córtex cerebral. ¿Podría una máquina imitar esta mente a medio camino entre el orden y el caos?

El poeta en la máquina

La creación de una obra, ya se trate de una teoría científica, un texto literario o una pintura, abre numerosas cuestiones. ¿Qué determina el estilo elegido por un artista? ¿Qué lo hace único? ¿Cómo se origina una idea nueva? ¿Cuál es la naturaleza del cambio de pensamiento que permite crear un nuevo paradigma? ¿Existen multitud de estilos posibles? Si nos fijamos en la multiplicidad de formas artísticas —en particular desde que los pintores se liberan de los límites del arte figurativo para adentrarse en la variedad de estilos que definen las distintas vanguardias del arte moderno (figura 7.1)—, podríamos concluir que el arte posee una diversidad infinita. Pero una inspección atenta nos proporciona una visión interesante de la aparición y desarrollo de la creatividad y de sus límites. En particular, nos será útil establecer algunas similitudes entre las trayectorias seguidas por creadores procedentes de disciplinas tan distintas como la física y la pintura. En su libro *Einstein y Picasso*, el historiador y profesor de filosofía de la ciencia Arthur I. Miller ha llevado a cabo este ejercicio estudiando a dos figuras clave del siglo xx: Pablo Picasso y Albert Einstein. Sus vidas, marcadas por un tiempo común en el que se estaba produciendo un cambio de visión del mundo paralelo al nacimiento de un siglo xx convulso, presentan notables paralelismos, dado que ambos buscaban una forma distinta de representar y comprender el espacio y el tiempo.*

Pablo Ruiz Picasso, en particular, se inspiró en parte en la descripción de la cuarta dimensión que le hizo Maurice Princet, un aficionado a las matemáticas que a su vez se había inspirado en el entonces famoso libro del genial Henri Poincaré titulado *Ciencia e hipótesis*, una obra que también Einstein había leído con interés. Princet frecuentaba el círculo del artista malagueño durante la primavera de 1907, cuando el pintor se disponía a realizar *Las señoritas de Avignon*. Esta obra se puede relacionar con algunos trabajos previos de otros artistas, en especial Paul Cézanne, así como el Greco o Gauguin. A su vez, la teoría de la relatividad se había inspirado en gran parte en la obra de Hendrik Lorentz, así como en los escritos filosóficos de David Hume y Ernst Mach. En el cubismo y la relatividad aparecen los vestigios de sus predecesores, y de algún modo la obra de éstos proporciona el marco sobre el que tiene lugar la revolución. Pero la visión de ambos genios fue más allá de lo que otros habían comprendido, y su impacto fue

extraordinario. Si bien los que los precedieron habían intuido algunos trazos de lo que iba a suceder, no fueron capaces de sacudirse los lastres del siglo XIX. Picasso y Einstein crearon el siglo XX. ¿Podría su contribución haber sido llevada a cabo por otros?:

Nos preguntamos cuál es el momento en el que todo se concita para producir percepciones increíbles. ¿Cómo ocurre? ¿Cómo surgen los pensamientos que van más allá de la información disponible? Para responder a estas preguntas es preciso utilizar un tipo de pensamiento y de análisis multidisciplinar [...]*

Buscar los orígenes de la creatividad, que necesariamente serán escurridizos, parece un ejercicio fútil. Al fin y al cabo, desconocemos la naturaleza de esta maravillosa propiedad de los seres humanos, y si los artistas que nos preceden pueden ser considerados como casos analizables de forma científica, se trata de experimentos únicos e irrepetibles. Como hemos planteado en anteriores capítulos, también aquí debemos preguntarnos si estamos frente a accidentes únicos o si las condiciones intelectuales, sociales y tecnológicas de la época proporcionaban el marco necesario para que, de una forma u otra, surgieran el cubismo o la relatividad (seguramente con diferente denominación) con otros nombres de hombres o mujeres singulares. En el terreno de la física, sabemos que Lorentz y otros habían llegado a desarrollar partes de la teoría, al menos en forma matemática. En gran medida, el alcance limitado de estos intentos se debió a la necesidad de romper con ideas establecidas durante cientos de años y cuya solidez nadie cuestionaba. No podemos decir lo mismo acerca de Picasso. ¿Quién habría podido reemplazarlo? En este terreno, una respuesta requiere un acercamiento al problema de la creatividad, su definición y sus límites. Sólo así podremos establecer, también aquí, los límites de lo posible y lo imposible.

Durante años, uno de los retos planteados por la inteligencia artificial ha sido el de diseñar programas de ordenador capaces de «crear» obras de arte. Esta idea tiene ya varias décadas de antigüedad, y se conecta profundamente con la noción misma de creatividad. Los seres humanos destacamos de forma especial —al igual que ocurre con nuestro lenguaje— por nuestra capacidad de imaginar soluciones nuevas a problemas no resueltos. Nunca conoceremos al primer humano que accidentalmente tuvo acceso al fuego y supo

preservarlo, o que dio con un método para encender una fogata. Sí sabemos que aquella tecnología fue crucial para nuestra supervivencia y es también uno de los pasos fundamentales para hacernos menos dependientes del clima, un clima que ha limitado y canalizado nuestra evolución.

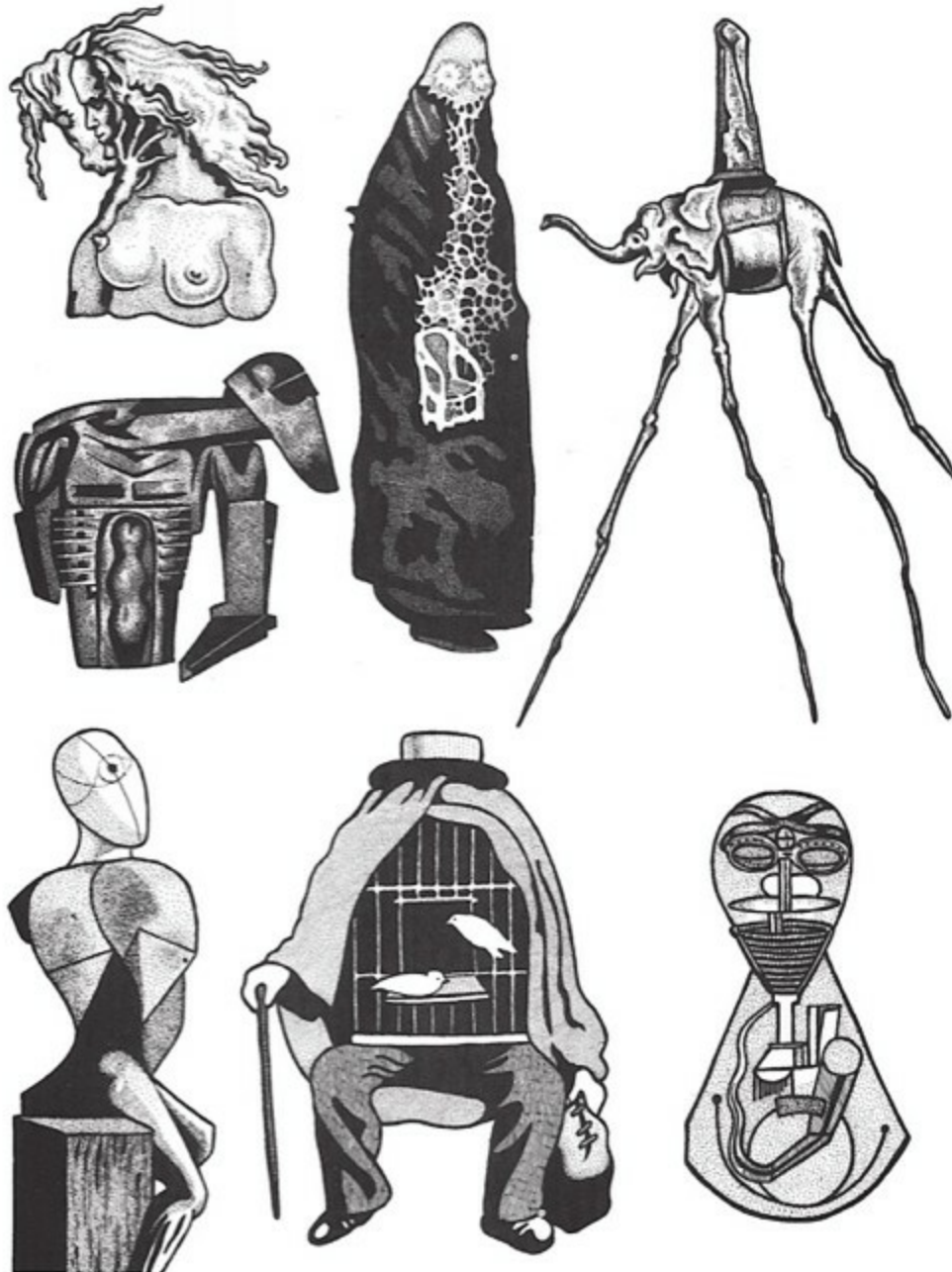


Figura 7.1. El arte del siglo XX se libera de los corsés de la representación figurativa y la percepción directa de la realidad, permitiendo una explosión de estilos sin precedentes. En estos dibujos se muestran reinterpretaciones de algunas obras destacadas de diversos artistas.

La creación llevada a cabo por las máquinas es una posibilidad real. Existen ya algunos sistemas capaces de generar automáticamente noticias, lo que los convierte en una primera generación de periodistas artificiales. En algunos campos, como es el caso de la prensa deportiva, creo que estos sistemas tienen bastante futuro, pero dudo de que el periodismo con mayúsculas, que integra diversas clases de ideas, presente y futuro, y sintoniza con las visiones de su tiempo, esté en peligro. ¿Lo están otras formas de creación? Estas preguntas ya se plantearon hace décadas, en el inicio de la experimentación sobre escritura artificial con los primeros programas que generaban «poesía por ordenador». Estos programas, ejecutados por un sistema informático, han sido concebidos para crear secuencias de frases. Estas secuencias siguen ciertos criterios que define el programador y que se mezclan con reglas aleatorias de composición. En un sentido, el programa hace algo en común con el poeta: explorar el espacio de posibilidades que tiene a su alcance. Pero la búsqueda en este espacio carece en general de un contexto y aunque de vez en cuando es posible leer sonetos sorprendentemente brillantes, la sorpresa está en la mente del que los lee. Existen muchos sistemas de generación automática de poesía que podemos emplear para experimentar. Tomemos un ejemplo extraído del libro de Ángel Carmona «Poemas compuestos por una computadora» (1976):

Gritaban acabados y radiantes sus versos
besando los pensamientos
extraviados de todos los golpes
porque habrá comenzado el minuto de no vivir.

Gritarán mágicos y fatales sus gritos
porque habrá acabado el minuto de no callar.

¿Dónde están los níveos desiertos
desde ahora muertos?
¡Oh, cómo me duelen las quietas flores
bajo los vómitos de mi locura
ya para siempre rotas!

El libro entero, que en su edición original aparecía impreso con las fuentes y fondo de una impresora de la época, es una sucesión de versos como los anteriores. La calidad de estas composiciones varía aquí y allá, y su lectura se vuelve tediosa al cabo de poco tiempo, sobre todo porque hay repeticiones poco sutiles de los «temas» que van apareciendo. Ésta es tal vez la indicación más clara de que el programa genera diversidad (las combinaciones al fin y al cabo se cuentan en millones) pero no logra alcanzar la profundidad del poeta auténtico. Pese a estas limitaciones, comprensibles al fin y al cabo, sí que es posible emplear este tipo de sistemas para ayudar al humano que compone y que, muy a menudo, puede quedar atrapado en su búsqueda de la palabra o la frase deseada. Así, podríamos utilizar esta tecnología como una extensión de nuestra capacidad de exploración, en lugar de verla como un sistema totalmente externo a nosotros.

Para algunos (probablemente la mayoría), ésta es una empresa absurda y su resultado tiene poco que ver con el arte. Para otros, representa toda una revelación. Pero no deja de ser divertido que, como ocurre con el arte «real» creado por humanos, especialmente si nos referimos al arte contemporáneo, también en este caso aparecen dos visiones más o menos extremas acerca de su valor o significado. Y en no pocos casos el valor de la obra tiene muy poco que ver con una gran creatividad, más bien tiene que ver con otro tipo de azar: el que imponen modas y mercados de arte. En cualquier caso, el empleo del azar combinado con ciertas reglas puede no ser una forma revolucionaria de crear. En un mundo de programas y algoritmos de combinación tradicional, el universo de lo posible puede ser muy limitado. Pero las cosas pueden haber empezado a cambiar con las nuevas formas de abordar el problema que se han ido desarrollando durante la primera década del siglo XXI, inspiradas en mayor o menor medida en la imitación del cerebro.

Resucitar a Van Gogh

Tenemos dos posibles formas de explorar los orígenes y la naturaleza de la creatividad. La primera consiste en considerar la creatividad en otras especies animales con la esperanza de que ésta nos ilumine sobre los orígenes de la nuestra. Aunque es posible proporcionar pinceles y pintura a un primate

y éste puede pintar sobre un lienzo algo parecido a una obra de arte contemporáneo (dicho sea con todo respeto), lo cierto es que tampoco aquí las comparaciones son posibles. En la figura 7.2 vemos un ejemplo de este llamado «arte animal», realizado por un chimpancé llamado *Congo*, que fue estudiado a mediados del siglo xx por el etólogo Desmond Morris, quien le proporcionó herramientas de pintura y lo observó durante años. Aunque el cuadro (uno de los cientos que realizó) es sugerente, no es muy distinto de todos los demás en complejidad y estructura. Nuestro pariente lejano nunca inventará una obra de arte figurativo, que de alguna forma nos muestre la realidad externa, ni una abstracta, que la reinterprete de manera inesperada.





Figura 7.2. ¿Pueden los primates crear obras de arte? En la imagen se muestran dos cuadros pintados por Congo, un chimpancé que fue estudiado durante años y que creó muchas obras similares a éstas.

De forma parecida a la poesía generada por ordenador, se han llevado a cabo diversos proyectos de arte informático en los que un programa crea pinturas que intentan recrear la personalidad de una obra «real». Durante una semana del mes de julio de 2013 se presentó una exposición en la galería Oberkampf de París, visitada y comentada como otras muchas, sólo que ésta tenía la peculiaridad de que las obras expuestas habían sido generadas por un programa informático llamado *The Painting Fool*, basado en sistemas de inteligencia artificial (un ejemplo de sus obras se muestra en la figura 7.3). Este programa es capaz de generar composiciones que permiten expresar cierto grado de emoción y convertir en dibujos o acuarelas una combinación de palabras. Podemos diseñar un robot con cierto grado de visión que pueda hacer un retrato de un ser humano o de un objeto, pero éste no será más que una manera de copiar de forma más o menos predecible lo que detecta el sistema de visión del autómatas, nada más. Pero *The Painting Fool* (que se presentaba en público como «un artista en ciernes») posee una primera capa de «empatía» simulada que le permitía hacer retratos, mientras duraba la exposición, según distintos tipos de respuestas emocionales. Este estado

emocional simulado determina una condición de partida para el programa, que selecciona los elementos con los que definir la obra. Mucho antes, en los años setenta, el programa AARON había iniciado este camino de la mano del artista británico Harold Cohen, pasando por diversos estilos y exponiendo también ocasionalmente.

Los algoritmos que crean arte han ido mejorando a lo largo del tiempo a medida que se han incorporado nuevas formas de simular peculiaridades del estilo artístico que exhiben los humanos. Sin embargo, con la llegada de una nueva generación de redes neuronales artificiales muy potentes, se ha podido dar un paso más y el resultado da que pensar. Las redes neuronales empezaron a ser estudiadas ya en los años cincuenta, en paralelo con la emergencia de los primeros ordenadores y la cibernética. Se basan en la imitación de algunas de las funciones características del cerebro, simulando las neuronas como sistemas más o menos simplificados pero interconectados de forma masiva. Es posible demostrar que estas redes poseen la capacidad de almacenar recuerdos, resolver problemas de optimización e incluso imitar algunas propiedades de percepción y toma de decisiones que se dan en sistemas neuronales naturales. A diferencia de otros sistemas simulados por ordenador, las redes neuronales no son programas clásicos, sino que resuelven problemas complejos mediante un proceso de cálculo paralelo similar al que tiene lugar en el interior de nuestra cabeza.



Figura 7.3. Un ejemplo de las obras de arte generadas por el programa informático The Painting Fool, dotado de inteligencia artificial y emociones simuladas. Esta y otras obras de este artista artificial pueden encontrarse en <http://www.thepaintingfool.com>.

En los años ochenta, el ingeniero electrónico japonés Kunihiko Fukushima publicó un artículo muy influyente acerca de cómo diseñar una red de neuronas capaz de reconocer letras aunque éstas estuvieran deformadas de diversas maneras. La idea es que, al igual que hacemos los humanos de manera rutinaria, si le mostramos a nuestra máquina una letra «a» de mayor o menor tamaño, inclinada a un lado u otro, más o menos alargada o con un estilo peculiar, la máquina debería ser capaz de identificarla correctamente como la letra «a», lo que requiere en cierto modo una capacidad de representación simbólica de esta vocal. El sistema de Fukushima imitaba una propiedad importante del córtex cerebral, que procesa información muy diversa empleando un procedimiento en el que la presencia de múltiples capas es crucial. Fukushima llamó a su red (figura 7.4) neocognitrón, y, mediante el entrenamiento adecuado, ésta era capaz de alcanzar sus objetivos con gran precisión. El reconocimiento de caracteres ha sido de hecho uno de los grandes éxitos de la inteligencia artificial y se ha ido extendiendo a otros problemas de complejidad aún mayor, como la identificación de caras. Pero no se ha detenido aquí. Los avances posteriores, que llegaron a principios del nuevo siglo de la mano de diversas innovaciones en el hardware y en la forma de construir las redes, permitieron diseñar una nueva forma de generar sistemas neuronales artificiales conocida como «aprendizaje profundo» (en inglés *deep learning*), con la que podemos llevar la filosofía inicial del neocognitrón a un nivel mucho más interesante. La red de Fukushima era capaz de extraer diversos niveles de complejidad de los caracteres que reconocía, de manera que creaba en su interior una representación abstracta y jerárquica de lo que cada símbolo representaba. Dicho de forma simplificada, la red es capaz de extraer la representación abstracta del símbolo mismo. En las redes de aprendizaje profundo, podemos lograr algo similar empleando imágenes.

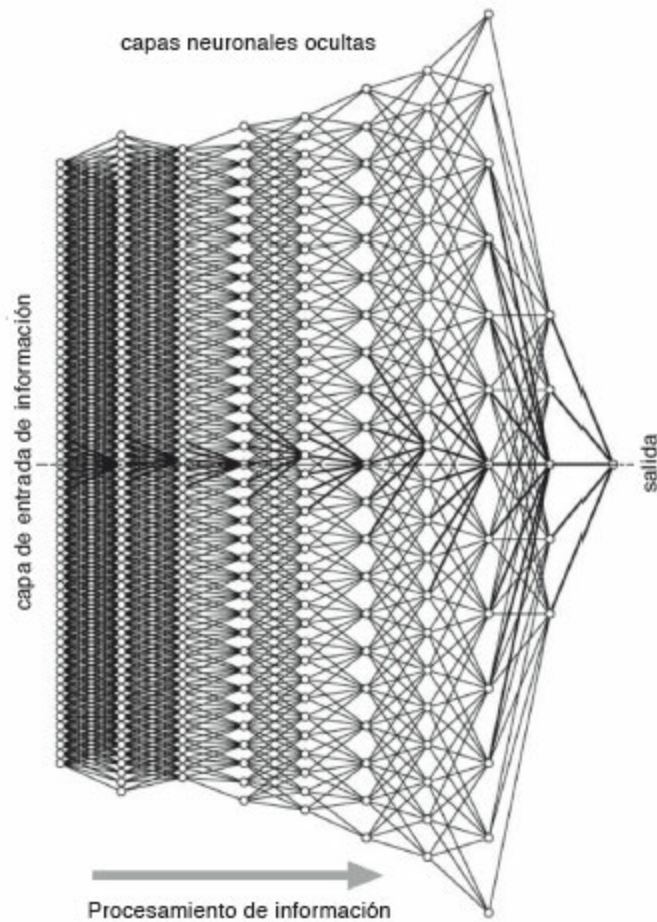


Figura 7.4. Esquema de las interconexiones entre distintas capas de neuronas artificiales en el neocognitrón de Fukushima. Estas redes de capas múltiples reciben entradas desde una capa inicial (imágenes, caracteres escritos, etcétera) que generan señales que se propagan a través de capas múltiples en las que se procesa la información. La salida es empleada para decidir si la máquina ha llevado a cabo correctamente su procesamiento (por ejemplo, si ha identificado la letra correcta empleando como entrada un texto escrito a mano) y modificar las conexiones de acuerdo con esta salida. Al final del proceso, la red aprende, por ejemplo, a reconocer sin fallos los caracteres de textos manuscritos de cualquier tipo.

Aunque la idea del neocognitrón se puede generalizar y es en principio extensible a otros problemas relacionados con el tratamiento de imágenes, no fue hasta comienzos del siglo XXI cuando pudo disponerse de un hardware lo bastante poderoso y eficiente. Hoy es posible entrenar estas redes mediante el empleo de millones de fotografías para que puedan también extraer multitud de componentes de cada una de ellas y ser capaces de identificar, en una imagen que jamás han visto antes, diversos objetos, paisajes o personas. Su

capacidad de reconocimiento de imágenes y su plasticidad para extraer distintas capas de contenido semántico son realmente impresionantes, y tres investigadores alemanes decidieron llevarla a otro nivel. Leon Gatys, Alexander Ecker y Matthias Bethge entrenaron a una red de aprendizaje profundo exponiéndola a obras de arte de distintos artistas, como Picasso, Van Gogh, Kandinski, Turner o Munch. Esta red emplea un sistema de reconocimiento de imágenes basado en representaciones neurales capaz de extraer el estilo de cada uno de los grandes maestros, como vemos en los ejemplos de la figura 7.5. En el proceso de aprendizaje, la red logra separar el contenido de las imágenes y el estilo subyacente (un conjunto de reglas complejas que incluyen los colores empleados, la forma de hacer las pinceladas y otras singularidades del artista) de forma que, frente a una nueva imagen, pueden reinterpretarla con el estilo aprendido. En este caso se había mostrado a la red una imagen —que no había sido presentada con anterioridad— de unas casas cerca de un río en la ciudad alemana de Tubinga, en la que trabajan estos investigadores. Es una imagen de cierta complejidad, con un río en el que se reflejan edificios, árboles y un cielo azul. La red crea una obra nueva a partir de esta imagen y del cuadro del artista que nuestro sistema artificial ha internalizado previamente. El resultado de este experimento es simplemente extraordinario: cada ejecución de nuestro sistema empleando una de las obras de los grandes maestros da lugar a una nueva obra más que digna de ellos. Nuestra red desconoce por completo qué está ejecutando, es completamente inconsciente de sus acciones y simplemente carece de una mente inteligente. A pesar de ello ha sido capaz —de algún modo— de atrapar la magia, la singularidad y el talento artístico de los grandes maestros. En la medida en que consideramos el genio artístico como esa particularidad poco común, intangible e irrepetible del artista, podemos decir que una parte de Van Gogh ha vuelto a la vida. Tal vez haya que acostumbrarse a esta idea y empezar a reflexionar sobre la creatividad fuera de una mente inteligente o consciente.

El ejemplo del artista artificial no es el único que incita a la reflexión. Los ordenadores ya han dado algunas sorpresas en el dominio de los juegos de estrategia. Dos buenos ejemplos son el ajedrez y el go (figura 7.6).

En 1997, el supercomputador Deeper Blue, creado por IBM, venció de forma inesperada al entonces campeón mundial, Garry Kasparov, quien un año antes había derrotado a una versión de la máquina (Deep Blue) dotada de un algoritmo de juego algo menos potente. Kasparov es considerado por muchos el mejor jugador de la historia y después de su primer éxito frente a Deep Blue afirmó que «las máquinas son estúpidas», lo que reflejaba la percepción general entre los jugadores de que el empleo de fuerza bruta era todo lo que aquellos algoritmos podían ofrecer. La victoria de la máquina sobre el humano cambió para siempre aquella percepción. Aunque los programas desarrollados posteriormente mejoraron aún más su capacidad para derrotar a los grandes maestros, aquél fue sin lugar a dudas un punto de no retorno.

No es extraño que el mismo gran maestro se viera enormemente sorprendido por su derrota, y un comentario de Kasparov (compartido por otros profesionales) es especialmente destacable: sintió que algunas de las jugadas llevadas a cabo por su contrincante digital eran «demasiado humanas» para ser ejecutadas por un ordenador, sugiriendo que IBM estaba haciendo trampas. Pero nadie se ocultaba dentro de la máquina. Con todo, es interesante la sugerencia de estudiosos como el experto en estadística y escritor Nate Silver, que han apuntado la posibilidad de que un error en el programa de Deeper Blue pudiera ser el responsable de una de las jugadas «sorprendentes» efectuadas por la máquina y que desconcertaron enormemente a Kasparov.

El éxito de Deeper Blue se basaba en una nueva forma de acercarse a los juegos de estrategia, pero donde la fuerza bruta seguía siendo un elemento clave, si bien el equipo que asesoró en la escritura del algoritmo incluía al gran maestro Joel Benjamin y durante su desarrollo el mismo programa determinaba los parámetros óptimos del juego basándose en un análisis de miles de partidas. Los siguientes pasos se dieron en la dirección de las redes que imitan a los artistas y a formas de razonamiento complejas. Entre otros éxitos (o derrotas, según cómo se mire) hay que mencionar la máquina AlphaGo, creada por los científicos de Google, que derrotó sin miramientos a uno de los mejores jugadores mundiales de go, el coreano Lee Sedol.

La elección de este objetivo no es arbitraria, dado que el desarrollo de programas que jueguen al go de forma profesional había sido desde siempre un gran reto para la inteligencia artificial. En marzo de 2016, el programa desarrollado mediante aprendizaje profundo cambió por completo esta situación, demostrando que un sistema que imita las formas de operar de los circuitos cerebrales puede no sólo acercarse al talento de los más expertos, sino superarlo. El mismo Lee Sedol asistió incrédulo a algunas jugadas llevadas a cabo por la máquina y que resultaban tan elegantes y originales que Sedol no dudó en llamar «bellas». Como en el estilo de los artistas, único y sin duda humano, parte de la genialidad de los grandes jugadores había sido extraída por el ordenador después de haber sido expuesto a millones de partidas.

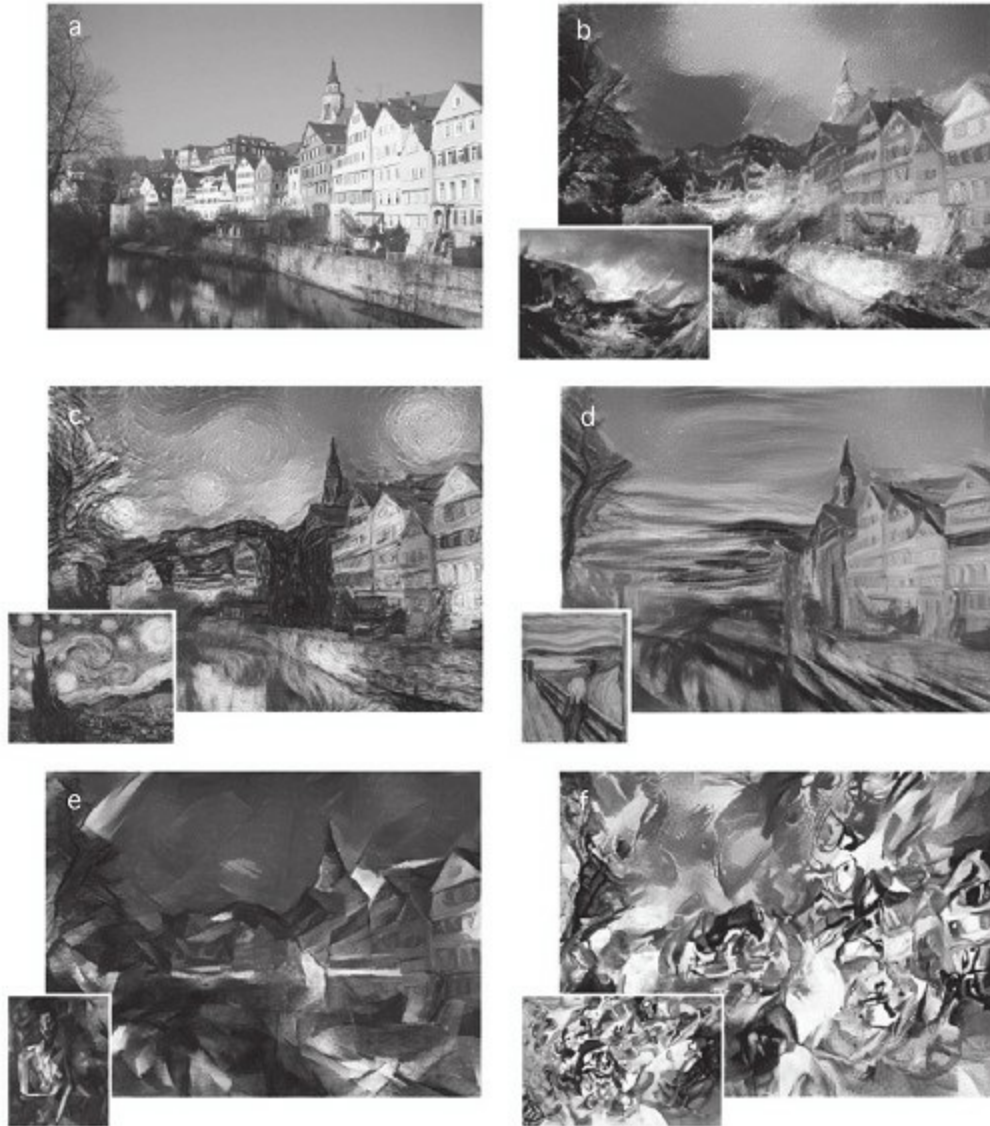


Figura 7.5. El artista en la máquina. Una red neuronal artificial entrenada para captar e internalizar el estilo de grandes maestros es capaz de reinterpretar imágenes (como la fotografía que se muestra en (a)) desde la perspectiva de: Turner (b), Van Gogh (c), Munch (d), Picasso (e) o Kandinski (f). Imagen tomada de «A Neural algorithm of artistic style». Disponible en: <http://arxiv.org/abs/1508.06576>.

La cuestión que nos viene a la mente es obvia: ¿estamos cerca de crear una máquina... capaz de crear? La investigadora y filósofa de la mente Margaret Boden ha sugerido que en realidad nos hallamos muy lejos de esta situación. En un artículo de 2009 publicado en la revista *AI Magazine*, Boden afirmaba que ni siquiera los lectores más jóvenes «deberían esperar ver estas cuestiones resueltas de forma definitiva a lo largo de su vida». Pero los éxitos inesperados de los sistemas artificiales, como experimentos que nos acercan a

los límites de lo posible, son un aviso para escépticos. Durante la evolución que lleva a nuestra especie se han dado saltos importantes que implicaron reutilizar distintas partes del cerebro de formas nuevas, conectando entre sí áreas de procesamiento hasta entonces inconexas. Las redes que hacen procesamiento masivo de imágenes, palabras o música todavía poseen una arquitectura relativamente simple, pero nada impide que —si poseen suficiente plasticidad y potencial de evolución— desarrollen formas novedosas de mejorar su manera de «entender» el mundo. Y no hay que olvidar que el estudio de la mente creativa indica que su naturaleza está lejos de ser continua.



Figura 7.6. Los juegos de estrategia, como el ajedrez o el go, requieren algo más que la fuerza bruta. Los sistemas tradicionales han utilizado algoritmos basados en ideas clásicas de inteligencia artificial, que emplean una aproximación de análisis exhaustivo de jugadas, que está limitado por el tiempo de cálculo. Los sistemas inspirados en la imitación de los procesos cognitivos se basan en arquitecturas de hardware distintas y especialmente en procesos de extracción de leyes que nuestro cerebro lleva a cabo de forma automática, lo que le permite establecer múltiples niveles de relación que luego se emplean para resolver problemas.

Golpe de genio

La genialidad de un artista o de un científico puede proceder de una combinación de genética y educación, pero no cabe duda de que el cerebro, como siempre, nos puede sorprender más allá de lo que nos dicen genes y escuelas. Y aquí las historias clínicas de algunos individuos excepcionales pueden dar pie a entender la naturaleza de la normalidad creativa.

El primer caso que vamos a examinar es el de Jancy Chang, una profesora de arte que a los cuarenta y tres años de edad fue diagnosticada de un tipo raro de demencia que afectaba principalmente al lado izquierdo del cerebro, en particular el lóbulo frontal (que controla nuestra capacidad de planificar y asimismo regula las emociones) y también el temporal. Los daños causados por la enfermedad provocan pérdida de memoria y de las inhibiciones, así como otros comportamientos inadecuados, pero en el caso de Chang, que siempre se había decantado por un estilo realista, estos síntomas habituales iban en paralelo con un cambio drástico en su estilo pictórico, que se desplazó hacia el impresionismo y a la realización de cuadros más abstractos, vivos y llenos de emociones.

Éste no era, como descubrió el médico que analizó a Chang, un caso aislado. Otros casos notables de pacientes con demencia eran el de un individuo que nunca había sentido interés por el arte y que terminó ganando premios por sus cuadros; otro, que nunca había aprendido música y terminó componiéndola con éxito, o el de un tercero que, cuando ya apenas podía emplear una docena de palabras, fue capaz de inventar dispositivos con diseños de ingeniería novedosos. En todos estos casos, se daba una asimetría similar: el daño se localizaba sobre todo en el hemisferio izquierdo del cerebro.

¿Qué ha ocurrido en los ejemplos anteriores? Se dice muy a menudo que todos disponemos de un enorme potencial de creatividad que permanece encerrado en nuestro cerebro. Y algunos ejemplos parecen apoyar esta idea. Uno de ellos es un caso famoso en el que un accidente que provocó daño cerebral convirtió en un artista de éxito a un individuo hasta entonces incapaz de crear nada remotamente parecido a una obra de arte. Nuestro protagonista es Jason Padgett, un vendedor de muebles de Tacoma (Estados Unidos) que

llevaba una vida un tanto disipada hasta que en 2002 fue salvajemente golpeado en un bar, y quedó inconsciente tras sufrir un serio traumatismo. Padgett nunca había sentido inclinación alguna por las matemáticas ni la lectura, pero al volver en sí tras el incidente, su mente había cambiado por completo. Por una parte sufría un síndrome de estrés postraumático que le causaba una constante ansiedad. Pero lo más increíble es que, repentinamente, para él todo parecía tener otro aspecto. La percepción de las cosas era distinta, con redes de líneas que ahora conectaban los detalles de objetos de todo tipo. Junto a esta nueva forma de percepción, empezó también a demostrar una insólita capacidad para dibujar objetos geométricos de enorme complejidad que le sugerían propiedades matemáticas profundas. El mismo Padgett, que era incapaz de asimilar conceptos simples de álgebra, descubrió una pasión tan grande por esta ciencia que lo llevó a convertirse en matemático.

Estos casos clínicos son enormemente reveladores y sugieren una concepción de la mente en la que ésta parece poseer un conjunto de estados muy diferentes entre los que, en las condiciones adecuadas, transitar de forma más o menos brusca. La biografía de algunos artistas bien conocidos apunta en esta misma dirección. Un caso especialmente interesante es el del aragonés Francisco de Goya, uno de los mayores genios de la pintura española, al que podemos asociar tanto con retratos clásicos de miembros de la nobleza como con algunas obras de enorme originalidad que plantean temas que denotan una imaginación desbordante. Los primeros pertenecen en su mayoría a la fase inicial de su vida como pintor, mientras que los segundos definen una etapa marcadamente diferenciada que se inicia con una grave enfermedad, posiblemente debida a la intoxicación por el plomo que empleaba en sus pinturas. Entre las secuelas que padeció se cuentan las pérdidas de equilibrio y una sordera que ya arrastró a lo largo de toda su existencia. La transición entre los dos periodos es realmente brusca. El Goya anterior a 1793 (el año en que se le declara su enfermedad) es un artista cortesano que retrata con enorme talento a reyes y príncipes, así como algunas escenas de caza o costumbristas. Aunque siguió haciendo retratos a lo largo de su vida, parece claro que su dolencia coincide con una forma distinta de pintar que define el punto de partida de la pintura romántica. Los grabados que conocemos como

los *Caprichos* inician la relación del pintor con una serie de representaciones dominadas por la oscuridad: peleas, ejecuciones y muchos otros temas lúgubres, violentos o simplemente sórdidos. Algunas de estas obras representan escenas de la vida cotidiana o de la guerra. Otras pertenecen al dominio de la fantasía y un tercer grupo parece habitar las fronteras entre ambas. Resulta difícil comprender que el Goya que empleaba el color y la luz para iluminar escenas de la realeza sea el mismo artista que nos provoca una enorme inquietud con sus célebres pinturas negras, algunas de las cuales apuntan claramente hacia un nuevo estilo.

También otros grandes creadores experimentaron un cambio de rumbo decisivo en el transcurso de su existencia. En cualquier caso, los ejemplos anteriores nos indican que existe la posibilidad de acceder a una creatividad que de algún modo está potencialmente disponible en nuestro cerebro. Los casos que hemos visto nos hablan de que —tal vez— ese potencial pueda ser liberado. Estas historias también nos sugieren que tenemos mucho que aprender acerca de la creatividad, y que ésta podría explicarse empleando las mismas redes neuronales que imitaban el estilo de Van Gogh. ¿Podríamos hacer que estas redes experimentaran un traumatismo simulado que las empujara a un estilo distinto? De ser así, dispondríamos de una forma de experimentar con la creatividad capaz de arrojar luz sobre los orígenes de ésta, pero también sobre sus límites. Tal vez no haya mucho más que ver más allá de los estilos que ya conocemos. Tal vez los estilos distintos que puedan generar nuestras imitaciones del córtex cerebral sólo sean combinaciones predecibles de lo que ya hemos visto antes. Pero quizá nos llevemos una sorpresa y del interior de una de estas redes sin conciencia, pero capaces de recrear el alma del artista, surja una nueva forma de arte. O tal vez descubramos que hay otras formas de mirar la realidad e interpretarla. Y quizás esa forma no se ajuste a lo que esperamos de una mente humana. Aunque también puede que algo así ya haya ocurrido antes.

El matemático imposible

En nuestra búsqueda de los límites de lo posible, nos hemos detenido a menudo a considerar lo imposible. Este último define la costa del primero, los límites del abismo del que nos habla Loren Eiseley cuando afirma que el artista y el científico nos traen «lo inesperado». Para encontrarnos con lo posible hemos intentado imaginar lo imposible. En este camino hemos empleado mundos simulados, la herencia de los escritores y directores de cine, o las obras de arte creadas por aquellos que, como dijo Maurits Escher, han visto más en las sombras que a la luz del día. Nos hemos cruzado con sirenas, cíclopes y mundos alienígenas. La mayoría de los recursos que hemos empleado provienen de la materia de la que proceden los sueños. Nuestro cerebro, este desconcertante fragmento de materia del que surge nuestra alegría y nuestra más profunda tristeza. Este cerebro que ha permitido que los científicos hayan podido ir más allá de lo que nadie hubiera podido soñar. Tan lejos, de hecho, que algunas de las teorías más relevantes de la historia de la ciencia desafían por completo la intuición.

Nos queda un último caso del que hablar. Se trata de una de las mentes más brillantes y desconcertantes de la historia: el matemático indio Shrinivasa Ramanujan (figura 7.7). Ramanujan (1887-1920) fue un individuo extraordinario en muchos sentidos. A pesar de una infancia llena de dificultades y carencias, pudo asistir a la escuela; a los trece años de edad ya dominaba la trigonometría avanzada y empezaba a demostrar sus propios teoremas. A los dieciséis años se cruzó en su camino un libro de George Carr que contenía una colección de cinco mil teoremas y que probablemente determinó el punto de inflexión en la vida del futuro matemático. Comprendió aquellos teoremas de manera autodidacta, como ya había ocurrido antes con su estudio de la trigonometría, y en este sentido Ramanujan desarrolló una forma propia de abordar los problemas que lo hizo único.

En su primer artículo demostró su asombrosa capacidad para manejar series infinitas. Pese a haber obtenido cierto reconocimiento por parte de algunos matemáticos de su entorno, sus dificultades para acceder a una posición académica (terminó trabajando de contable en una pequeña oficina en la ciudad de Madrás) le llevaron a considerar la posibilidad de irse al extranjero. Decidió escribir tres cartas, que envió a sendos matemáticos

británicos con la esperanza de que alguno de ellos apreciara su talento. Las cartas venían acompañadas de páginas de expresiones matemáticas como: sin más. En condiciones normales, una expresión como la anterior se escribiría junto a todos los pasos que llevan de la integral de la izquierda a la fórmula de la derecha. Estos pasos intermedios definen el proceso de *demostración* matemática que permite comprobar su validez, y éste es el procedimiento lógico de presentar los resultados. Dado que en las cartas de Ramanujan simplemente aparecían el inicio y el final de este proceso, resultaba difícil a primera vista decidir acerca de su valor real. De hecho, Ramanujan estaba ya entonces recopilando sus cuadernos de notas (figura 7.7), que esencialmente eran listas inacabables de teoremas sin demostración.

$$\int_0^{\infty} \frac{1+x^2/(b+1)^2}{1+x^2/a^2} \times \frac{1+x^2/(b+2)^2}{1+x^2/(a+1)^2} \times \dots dx = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \times \frac{\Gamma(a+\frac{1}{2})\Gamma(b+1)\Gamma(b-a+1)}{\Gamma(a)\Gamma(b+\frac{1}{2})\Gamma(b-a+\frac{1}{2})}.$$

Dos de los matemáticos ingleses ignoraron la petición de Ramanujan, pero el tercero quedó vivamente impresionado. Se trataba del gran Godfrey Harold Hardy, que prestó más atención a aquellas páginas y que intuyó que detrás de aquellas 120 expresiones había algo realmente grande: «Algunas de las fórmulas de Ramanujan me desbordan, pero tenían que ser verdaderas, porque de no serlo, nadie habría tenido la imaginación necesaria para inventarlas». Hardy invitó a Ramanujan a Inglaterra, y los años siguientes fueron enormemente fructíferos para ambos, aunque a Hardy le resultaba difícil comprender la forma de pensar de su nuevo colega:

las limitaciones de sus *conocimientos* eran tan sorprendentes como su profundidad. Era capaz de resolver ecuaciones modulares y teoremas de un modo jamás visto antes, su dominio de las fracciones continuas era superior al de cualquier otro matemático del mundo; ha encontrado por sí solo la ecuación funcional de la función zeta y los términos más importantes de la teoría analítica de los números; sin embargo no había oído hablar jamás de una función doblemente periódica o del Teorema de Cauchy y poseía una vaga idea de lo que era una función de variable compleja.

Dicho de otro modo: lo que un matemático de primera fila educado de forma clásica conocía por defecto, era totalmente desconocido para aquel autodidacta que no se había formado a la manera tradicional. Se ha dicho, y con razón, que mantenía una relación especial con los números y las series infinitas, y en particular con el número pi. Éste es uno de los números

mágicos que pueblan el universo matemático, cuyo símbolo griego π empleamos casi a diario en muchas fórmulas. Descubrió un gran número de expresiones para escribir este número irracional en forma de fracciones, expresiones como ésta que él (y sólo él) solía ver así en su mente:

$$1 + \frac{1}{1 + \frac{e^{-2\pi}}{1 + \frac{e^{-4\pi}}{1 + \frac{e^{-6\pi}}{1 + \frac{e^{-8\pi}}{1 + \frac{e^{-10\pi}}{\dots}}}}}}}} = \left(\sqrt{\frac{5 + \sqrt{5}}{2}} - \frac{1 + \sqrt{5}}{2} \right) e^{2\pi/5}$$

No es casualidad que una de sus biografías más exhaustivas se titule *El hombre que conocía el infinito*, escrita por Robert Kanigel en 1991 y llevada a la pantalla en 2015 bajo la dirección de Matthew Brown. Desgraciadamente, los años de creatividad desbordante se vieron interrumpidos demasiado pronto. Debido a diversas complicaciones de salud, Ramanujan murió con tan sólo treinta y dos años, pero dejó un legado de varios cuadernos con miles de ecuaciones que han dado trabajo a generaciones de matemáticos.

Durante su estancia en Inglaterra estuvo enfermo en varias ocasiones, y en una visita al hospital, Hardy intentó animar al paciente comentándole que había visto una matrícula de taxi con un número «muy aburrido»: el 1729. Ramanujan repuso inmediatamente que no lo era en absoluto. Por el contrario, era un número muy interesante: «Es el número entero más pequeño que puede expresarse de dos formas distintas como la suma de dos enteros elevados al cubo». Concretamente, tenemos que:

$$1729 = 10^3 + 9^3$$

$$1729 = 12^3 + 1^3$$

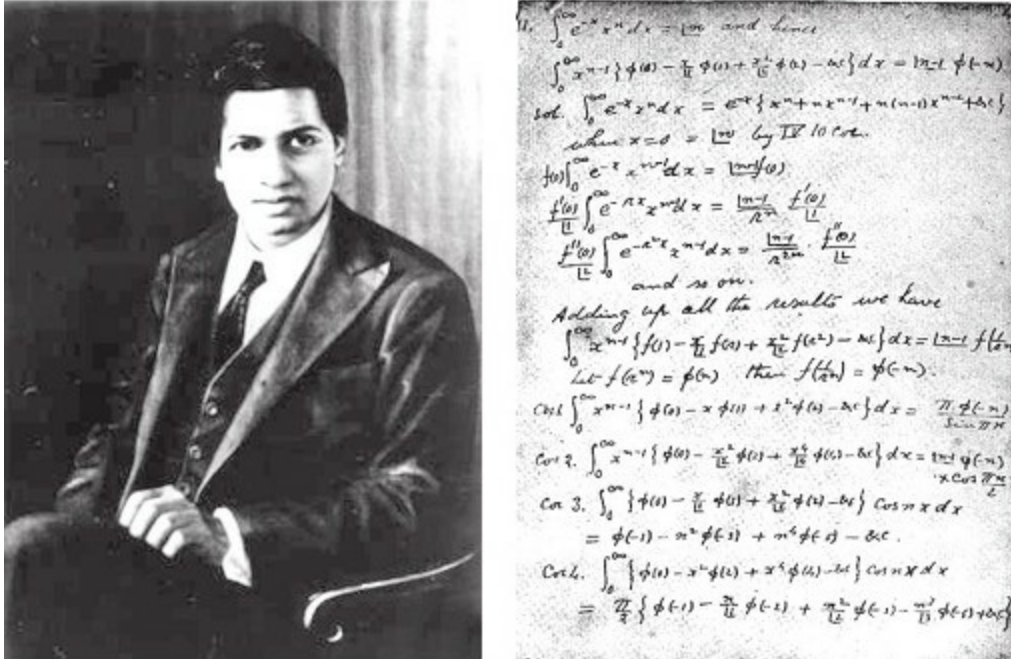


Figura 7.7. Shrinivasa Ramanujan (1887-1920), uno de los más grandes matemáticos de la historia, que dejó tras de sí un legado (que incluía numerosas ecuaciones almacenadas en sus famosos cuadernos, imagen de la derecha) de enorme complejidad y originalidad. Estos cuadernos han inspirado a generaciones de matemáticos hasta hoy.

Este ejemplo ilustra a la perfección la relación especial que Ramanujan mantenía con los números. Su mente poseía algo especial que le permitía ver, de forma profunda e inmediata, un orden que él podía traducir en expresiones matemáticas que parecían imposibles. ¿Cómo podía «ver» semejantes relaciones?

En 1976, muchos años después de su muerte, se encontró el llamado *Cuaderno perdido de Ramanujan*, con unas seiscientas fórmulas que había escrito en su último año de vida. El matemático americano Bruce Berndt señaló que «el descubrimiento del *Cuaderno perdido* provocó en el mundo matemático el mismo efecto que hubiera causado en el mundo musical el descubrimiento de una décima sinfonía de Beethoven». Lamentablemente, no sabemos qué hacía tan singular aquella mente extraordinaria. Quizá fue su educación poco ortodoxa, o tal vez una fascinación por los números y el infinito que desarrolló con un desconocimiento total de campos clave de la matemática. En cualquier caso, su ejemplo nos dice que probablemente existan formas alternativas de pensamiento que quedan fuera de nuestro

alcance cuando hemos educado nuestra mente en cierto conjunto de reglas. De ser así, existirían espacios en blanco en el mapa de lo posible a los que nadie ha accedido jamás y en los que nos aguardan formas distintas de pensar, inventar e incluso de definir teorías. Nosotros o las máquinas, tarde o temprano, tendremos una cita en alguna de estas islas desconocidas.

Apéndices

Referencias

Introducción

- Alberch, P. 1989. The logic of monsters. *Geobios* 22, 21-57.
- Goodwin, B.C. 1998. *Las manchas del leopardo*. Tusquets Editores, col. Metatemas, Barcelona.
- Gould, S.J. 2006. *La vida maravillosa*. Editorial Crítica, Barcelona.
- Solé, R., y Goodwin, B.C. 2001. *Signs of Life*, Basic Books, Nueva York.

1. Turing encuentra a Darwin

- Freeland, S.J., y Laurence D.H. 1998. The genetic code is one in a million. *Journal of molecular evolution* 47, 238-248.
- . 2004. La evolución codificada. *Investigación y Ciencia* 333, 60-67.
- Peretó, J. 1994. *Orígenes de la evolución biológica*. Eudema, Madrid.
- Schrödinger, E. 1983. *¿Qué es la vida?* Tusquets Editores, col. Metatemas, Barcelona.
- Turing, D. 2015. *Alan Turing decoded*. The History Press, Londres.
- Walker, S., y Davies, P. 2013. The algorithmic origins of life. *Journal of the Royal Society Interface* 10, 20120869.
- Watson, J.D., y Crick, F., 1953. Molecular structure of nucleic acids. *Nature* 171, 737-738.

2. El mundo perdido molecular

- Asimov, I. 1988. *¿Hay alguien ahí?* Plaza & Janés, Barcelona.
- Ball, P. 2015. *H₂O: A biography of water*. Hachette, Reino Unido.
- Banavar, J.R., y Maritan, A. 2003. Colloquium: Geometrical approach to protein folding: a tube picture. *Reviews of Modern Physics* 75, 23-34.

- Benner, S.A.; Ricardo, A., y Carrigan, M.A. 2004. Is there a common chemical model for life in the universe? *Curr. Opinion Chemical Biol.* 8, 672-689.
- Davies, P.C.W., et al. 2009. Signatures of a shadow biosphere. *Astrobiology* 9, 241-249.
- Koonin, E.V., y Novozhilov, A.S. 2009. Origin and evolution of the genetic code: the universal enigma. *IUBMB Life* 61, 99-111.
- Llardo, M., et al. 2015. Extraordinarily adaptive properties of the genetically encoded amino acids. *Scientific reports* 5, 9414.
- Miller, S.L. 1953. A production of amino acids under possible primitive earth conditions. *Science* 117, 528-529.
- Morowitz, H.J. 2004. *Beginnings of cellular life: metabolism recapitulates biogenesis*. Yale University Press, New Haven y Londres.
- Mulkidjanian, A.Y., et al. 2012. Origin of first cells at terrestrial, anoxic geothermal fields. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109, E821-E830.
- Oró, J. 1960. Synthesis of adenine from ammonium cyanide. *Biochem. Biophys. Res. Commun.* 2, 407-412.
- . 1961. Comets and the formation of biochemical compounds on the primitive Earth. *Nature* 190, 389-390.
- Oró, J., Miller, S.L., y Lazcano, A. 1990. The origin and early evolution of life on Earth. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 18, 317-356.
- Ruiz-Mirazo, K.; Briones, C., y De la Escosura, A. 2013. Prebiotic Systems Chemistry: New Perspectives for the Origins of Life. *Chemical Reviews* 114, 285-366.
- Smith, E., y Morowitz, H.J. 2016. *The origin and nature of life on Earth*. Cambridge University Press.

3. Cantos de sirena

- Alberch, P. 1982. Developmental constraints in evolutionary processes. En: *Evolution and development*. Springer Berlin Heidelberg, págs. 313-332.
- . 1989. The logic of monsters. *Geobios* 22, 21-57.

- . 1991. From genes to phenotype: dynamical systems and evolvability. *Genetica* 84, 5-11.
- Asma, S.T. 2011. *On monsters: An unnatural history of our worst fears*. Oxford University Press.
- Bondeson, J. 1999. *The feejee mermaid and other essays in natural and unnatural history*. Cornell University Press.
- Domingo, E. 1996. *Virus en evolución*. Editorial Eudema, Madrid.
- Gavelis, G.S., et al. 2015. Eye-like ocelloids are built from different endosymbiotically acquired components. *Nature* 523, 204-207.
- Hayakawa, Shiho, et al. 2015. Function and evolutionary origin of unicellular camera-type eye structure. *PloS one* 10, e0118415.
- Morris, S.C. 2003. *Life's Solution. Inevitable Humans in a Lonely Universe*. Cambridge University Press.
- Paré, A. 1987. *Monstruos y prodigios*. Ediciones Siruela, Madrid.
- Richards, T.A., y Gomes, S.L. 2015. Protistology: How to build a microbial eye. *Nature* 523, 166-167.
- Solé, R., y Sardanyés., J. 2014. Red Queen coevolution on fitness landscapes. En: *Recent Advances in the Theory and Application of Fitness Landscapes*. Springer, Berlín, págs. 301-338.

4. *Mentes posibles*

- Adamatzky, A. 2010. *Physarum machines: computers from slime mould*. World Scientific.
- . A would-be nervous system made from a slime mold. *Artificial life* 21, 73-91.
- Bickerton, D. 1992. *Language and species*. University of Chicago Press.
- Deacon, T. 1997. *The symbolic species. Coevolution of language and the brain*. Norton, Nueva York.
- DeSalle, R., et al. 2015. *Wellcome to the microbiome*. Yale University Press.
- Ferrer i Cancho, R., y Solé, R. 2001. The small world of human language. *Proceedings of the Royal Society of London B* 268, 2261-2265.

- Hauser, M. 2009. El origen de la mente. *Investigacion y Ciencia*. 398, 54-61.
- Iacoboni, M. 2009. Imitation, empathy, and mirror neurons. *Annual review of psychology* 60, 653-670.
- Moro, A. 2008. *The boundaries of Babel*. MIT Press.
- Smith, N.V.; Tsimpli, L-M., y Ouhalla, J. 1993. Learning the impossible: The acquisition of possible and impossible languages by a polyglot savant. *Lingua* 91, 279-347.
- Ramachandran, S. 2011. *The tell-tale brain. A neuroscientist's quest for what makes us human*. Norton, Nueva York.
- Reymer, R. 1993. *Genie. A scientific tragedy*. Harper and Collins, Nueva York.
- Solé, R.; Corominas, B., y Fortuny, J. 2013. Lenguaje, redes y evolución. *Investigación y Ciencia* 440, 58-67.
- Solé, R., y Seoane, L. 2015. Ambiguity in language networks. *The Linguistic Review* 32, 5-35.
- Suddendorf, T. 2013. *The Gap. The science of what separates us from other animals*. Basic Books, Nueva York.

5. Utopía(s)

- Ceram, C.W. 1986. *Dioses, tumbas y sabios*. Ediciones Orbis, Barcelona.
- Diamond, J. (2005) *Colapso: Por qué unas sociedades perduran y otras desaparecen*. Debate, Barcelona.
- Michel, J.-B., et al. 2011. Quantitative analysis of culture using millions of digitized books. *Science* 33, 176-182.
- Solé, R.; Valverde, S.; Rosas-Casals, M.; Kauffman, S.A.; Farmer, D., y Eldredge, N. 2013. The evolutionary ecology of technological innovation. *Complexity* 18, 15-27.
- Solé, R. 2009. *Redes complejas. Del genoma a Internet*. Tusquets Editores, col. Metatemas, Barcelona.
- Steffen, W., et al. 2011. The Anthropocene: from global change to planetary stewardship. *AMBIO* 40, 739-761.
- Wilson, E.O. 2012. *La conquista social de la Tierra*. Debate, Barcelona.

6. Sobre gatos y universos

- Abbott, E. 1976. *Planilandia*. Guadarrama, Madrid.
- Byrne, P. 2008. Los muchos mundos de Hugh Everett. *Investigación y Ciencia* 377, 72-79.
- DeWitt, B.S. 1970. Quantum mechanics and reality. *Physics Today* 23, 155-167.
- Gribbin, J. 1985. *En busca del gato de Schrödinger: la fascinante historia de la mecánica cuántica*. Salvat Editores, Barcelona.
- Pickover, C.A. 2001. *Surfing through hyperspace: Understanding higher universes in six easy lessons*. Oxford University Press.
- Rees, M. 2003. *Our cosmic habitat*. Princeton University Press.
- Rucker, R. 1987. *La cuarta dimensión: hacia una geometría más real*. Salvat Editores, Barcelona.
- Smolin, L. 1997. *The life of the cosmos*. Oxford University Press.
- Tegmark, M. 2015. *Nuestro universo matemático*. Antoni Bosch Editor.

7. Desde el abismo oscuro

- Boden, M.A. 1998. Creativity and artificial intelligence. *Artificial Intelligence* 103, 347-356.
- . 2009. Computer models of creativity. *AI Magazine* 30, 23-34.
- Carmona, A. 1976. *Poemas V2. Poesía compuesta por una computadora*. Star Books, Producciones Editoriales, Barcelona.
- Fukushima, K. 1980. Neocognitron: A self-organizing neural network model for a mechanism of pattern recognition unaffected by shift in position. *Biological cybernetics* 36, 193-202.
- Gatys, L.; Ecker, A.S., y Bethge, M. 2015. A neural algorithm of artistic style. *arXiv1508.06576*.
- Kanigel, R. 2013. *The man who knew infinity*. Simon and Schuster, Nueva York.
- LeCun, Y.; Bengio, Y., y Hinton, G. 2015. Deep learning. *Nature* 521, 436-444.
- Miller, A.I. 2007. *Einstein y Picasso: el espacio, el tiempo y los estragos de la belleza*. Tusquets Editores, col. Metatemas, Barcelona.

Notas

* Alef, símbolo de los números transfinitos de Cantor

* Publicado en Tusquets Editores, col. Metatemas 1, Barcelona, 1983. (*N. del E.*)

* Véase *Einstein y Picasso. El espacio, el tiempo y los estragos de la belleza*, Tusquets Editores, col. Metatemas, Barcelona, 2007. Traducción de Jesús Cuéllar. (N. del E.)

* Arthur I. Miller, *Einstein y Picasso*, ed. cit., pág. 22.

La lógica de los monstruos
¿Hay alternativas a la naturaleza tal como la conocemos?
Ricard Solé

No se permite la reproducción total o parcial de este libro, ni su incorporación a un sistema informático, ni su transmisión en cualquier forma o por cualquier medio, sea éste electrónico, mecánico, por fotocopia, por grabación u otros métodos, sin el permiso previo y por escrito del editor. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual (Art. 270 y siguientes del Código Penal)

Diríjase a CEDRO (Centro Español de Derechos Reprográficos) si necesita reproducir algún fragmento de esta obra.

Puede contactar con CEDRO a través de la web www.conlicencia.com o por teléfono en el 91 702 19 70 / 93 272 04 47

Ilustración de la portada: © Diego Mallo
Diseño de la colección: Departamento de Arte y Diseño
Área Editorial Grupo Planeta

© Ricard Solé, 2016

Reservados todos los derechos de esta edición para
Tusquets Editores, S.A. - Av. Diagonal, 662-664 - 08034 Barcelona (España)
www.tusquetseditores.com

Primera edición en libro electrónico (epub): septiembre de 2016

ISBN: 978-84-9066-331-8 (epub)

Conversión a libro electrónico: Newcomlab, S. L. L.
www.newcomlab.com