La gran historia de todo

Desde el Big Bang  a las primeras estrellas, nuestro sistema solar, la vida en la Tierra, los dinosaurios,  el *homo*  *sapiens*,  la agricultura, la Edad de Hielo,  los imperios, los combustibles fósiles, el alunizaje y la globalización  masiva. Y lo que el futuro nos depara...

David Christian

CRÍTICA

Índice

PORTADA
SINOPSIS
PORTADILLA
PREFACIO
INTRODUCCIÓN
CRONOLOGÍA
PRIMERA PARTE. EL COSMOS
CAPÍTULO 1. EN EL PRINCIPIO: UMBRAL 1
CAPÍTULO 2. ESTRELLAS Y GALAXIAS: UMBRALES 2 Y 3
CAPÍTULO 3. MOLÉCULAS Y SATÉLITES: UMBRAL 4
SEGUNDA PARTE. LA BIOSFERA
CAPÍTULO 4. VIDA: UMBRAL 5
CAPÍTULO 5. LA MICROBIOLOGÍA Y LA BIOSFERA
CAPÍTULO 6. LA MACROBIOLOGÍA Y LA BIOSFERA
TERCERA PARTE. NOSOTROS
CAPÍTULO 7. SERES HUMANOS: UMBRAL 6
CAPÍTULO 8. AGRICULTURA Y GANADERÍA: UMBRAL 7
CAPÍTULO 9. LAS CIVILIZACIONES AGRARIAS
CAPÍTULO 10. A LAS PUERTAS DEL MUNDO ACTUAL
CAPÍTULO 11. EL ANTROPOCENO: UMBRAL 8
CUARTA PARTE. EL FUTURO
CAPÍTULO 12. ¿Y ADÓNDE NOS LLEVA TODO ESTO?
AGRADECIMIENTOS
APÉNDICE. ESTADÍSTICAS ASOCIADAS CON LA HISTORIA DE LA HUMANIDAD
GLOSARIO
PARA SEGUIR LEYENDO
NOTAS
CRÉDITOS

Gracias por adquirir este eBook

Visita **Planetadelibros.com** y descubre una
nueva forma de disfrutar de la lectura

¡Regístrate y accede a contenidos exclusivos!

Primeros capítulos
Fragmentos de próximas publicaciones
Clubs de lectura con los autores
Concursos, sorteos y promociones
Participa en presentaciones de libros

PlanetadeLibros

Comparte tu opinión en la ficha del libro
y en nuestras redes sociales:

Explora **Descubre** **Comparte**

SINOPSIS

David Christian, el creador de la «big history», de la «gran historia» que enlaza la evolución del cosmos, de la vida y de la humanidad para ofrecernos una perspectiva distinta de los grandes problemas del Antropoceno, culmina su obra con este libro realmente único, que discurre desde el big bang, el sistema solar, la aparición de la vida, los dinosaurios, el homo sapiens y los grandes imperios hasta la globalización. Un libro que ha despertado el entusiasmo de lectores como Bill Gates o el físico Carlo Rovelli quien considera esta disciplina «un método espectacular para, a través de la historia, poner orden en todos nuestros conocimientos sobre el mundo».

DAVID CHRISTIAN

LA GRAN HISTORIA DE TODO

Una gran historia desde el Big Bang a las primeras estrellas, nuestro sistema solar, la vida en la Tierra, los dinosaurios, el *Homo sapiens*, la agricultura, la Edad de Hielo, los imperios, los combustibles fósiles, el alunizaje y la globalización masiva. Y lo que el futuro nos depara...

Traducción castellana de
Tomás Fernández Aúz

CRÍTICA
BARCELONA

PREFACIO

«Contamos relatos para dar sentido a las cosas. Forma parte de nuestra naturaleza.»

Lia Hills, *Return to the Heart*

La idea de una historia moderna de los orígenes flota en el ambiente. En mi caso, el interés por este campo se inició con el curso sobre historia global que comencé a impartir en la Universidad Macquarie de Sídney en 1989. Desde mi punto de vista, aquel curso me ofrecía la oportunidad de adentrarme en la historia del género humano. Por esa época, el eje de mi actividad docente y mis investigaciones giraba en torno a la historia de Rusia y de la Unión Soviética. Me preocupaba, sin embargo, la posibilidad de que el hecho de enseñar la historia de una nación o de un imperio (Rusia era ambas cosas) estuviera trasladando a mis alumnos el mensaje subliminal de que los seres humanos se hallan divididos, en el plano más elemental, en un conjunto de tribus enfrentadas. ¿Resultaba de alguna utilidad la difusión de esa idea en un mundo atestado de armas nucleares? En mis años de colegial, cuando estalló la crisis de los misiles de Cuba, recuerdo clarísimamente haber sentido que nos encontrábamos al borde de un apocalipsis. Todo estaba a punto de destruirse. Recuerdo también haberme preguntado entonces si los chicos «de allá», los de la Unión Soviética, estarían tan asustados como yo. A fin de cuentas, también ellos eran seres humanos. De niño había vivido durante un tiempo en Nigeria y esa experiencia me dejó la profunda percepción de formar parte de una única comunidad humana, extraordinariamente diversa, y esa sensación

fue confirmándose con el tiempo cuando, ya de adolescente, entré en el Colegio del Mundo Unido del Atlántico, un instituto internacional en Gales del Sur.

Varias décadas más tarde y ya como historiador profesional, empecé a plantearme cómo enseñar una historia unificada de la humanidad. ¿Podría transmitir el legado que compartimos todos los seres humanos y relatar su historia con al menos parte de la grandeza y la solemnidad que caracterizan las grandes historias nacionales? Acabé por convencerme de que necesitábamos una historia en la que nuestros antepasados paleolíticos y los granjeros del Neolítico desempeñaran un papel tan relevante como los gobernantes, conquistadores y emperadores que protagonizan la historia académica.

Al final, comprendí que estos planteamientos no respondían a una idea original. En 1986, el gran historiador universal William McNeill expuso el argumento de que, en nuestra época, «los profesionales de la historia tienen el deber moral» de referir «los triunfos y tribulaciones del conjunto de la humanidad».[1] Y antes de esa fecha, aunque con idéntico aliento, H. G. Wells redactaba una historia de la humanidad en respuesta a la carnicería de la primera guerra mundial.

> Hoy alcanzamos a comprender al fin que la única paz posible es aquella que llegue a todo el mundo, y también vemos con claridad que no existe otra prosperidad factible que la universalmente compartida. Ahora bien, mientras seamos incapaces de compartir nuestras ideas históricas seguirá siendo imposible concretar esa paz y esa prosperidad generales... Mientras no dispongamos sino de tradiciones nacionalistas de carácter egoísta, miras estrechas y tendencias conflictivas, las razas y los pueblos estarán abocados a la contienda y a la destrucción.[2]

Wells advirtió asimismo otra cuestión: si uno pretende enseñar historia de la humanidad, es muy probable que deba impartir la gran historia de todo. Por este motivo su obra *Outline of History* acabó convirtiéndose en una historia del universo. Quien desee comprender la historia de la humanidad deberá examinar la

evolución de esa extraña especie que es la especie humana, y esto implica conocer las transformaciones que ha venido experimentando la vida en la Tierra, lo que a su vez conlleva el estudio de la evolución del propio planeta, análisis que nos conduce a investigar el proceso de formación, desarrollo y muerte de las estrellas y los planetas, lo cual en último término nos llevará a estudiar la evolución y el progreso del universo entero. Hoy en día estamos en condiciones de abordar ese inmenso relato con una precisión y un rigor científico que resultaban impensables en los tiempos de H. G. Wells.

A lo que Wells aspiraba era a la unificación del conocimiento, tanto entre disciplinas diversas como entre comunidades humanas. Todas las historias que parten de los orígenes tienden a agrupar el saber, incluso las elaboradas por la historiografía nacionalista. De hecho, las más competentes pueden hacer que el lector recorra un gran número de dimensiones temporales y un sinfín de círculos concéntricos de conciencia e identidad, del yo personal a la familia, el clan, la nación, el grupo lingüístico o la afiliación religiosa, hasta desembocar en los amplios círculos de la humanidad y la vida, hasta llegar a la idea de que formamos parte de un vasto universo o cosmos.

No obstante, en los siglos más recientes el incremento del contacto entre las diferentes culturas nos ha mostrado cuán profundamente hunden sus raíces estas historias de los orígenes y de las religiones en las costumbres y los contextos locales. Esto es lo que explica que la globalización y la difusión de nuevas ideas hayan socavado la fe de muchos individuos en el conocimiento tradicional. Incluso los más fervorosos creyentes han comprendido que existen múltiples relatos sobre los orígenes que afirman cosas muy distintas. Hay quien reacciona a ello con una actitud agresiva o incluso violenta de defensa de sus prácticas religiosas, tribales o nacionales. Otros, sin embargo, se limitan sencillamente a perder su fe y sus convicciones, lo que les deja sin puntos de referencia, o lo que es lo mismo: sin conciencia del lugar que ocupan en el universo. Esa

pérdida de fe contribuye a explicar la propagación de la *anomia*, la sensación de falta de rumbo o de sentido, y en ocasiones hasta de desesperación, que moldeó buena parte de la literatura, el arte, la filosofía y el conocimiento académico del siglo xx. Abundan quienes consideran que el nacionalismo ofrece un sentimiento de pertenencia, pero en un mundo contemporáneo interconectado está quedando de manifiesto que el nacionalismo divide al género humano, aun cuando vincula a los ciudadanos de un determinado país.

He escrito este libro con el optimista convencimiento de que los seres humanos modernos no estamos abocados a una crónica situación de fragmentación y sinsentido. En el torbellino creativo de la modernidad está surgiendo una historia global de los orígenes tan dotada de sentido, tan capaz de impresionar y tan intrigante como cualquier historia de los orígenes tradicional, aunque en este caso se basa en la erudición científica moderna que hoy tiende puentes transversales capaces de unir entre sí a un gran número de disciplinas.[3] Esa narrativa dista mucho de haber alcanzado un grado de completitud definitivo y es probable que deba incorporar las intuiciones de las antiguas historias del origen sobre el modo de llevar una vida buena y una existencia sostenible.

No obstante, merece la pena conocer la nueva historia del comienzo porque se nutre de un legado de informaciones y conocimientos meticulosamente confirmados y porque es la primera gran historia de todo que incluye un conjunto de sociedades humanas y de culturas de todo el mundo. Se trata de un proyecto colectivo y global, de un relato válido tanto en Buenos Aires como en Pekín, Lagos o Londres. En la actualidad, muchos estudiosos están comprometidos en la emocionante empresa de elaborar y narrar la historia moderna de los orígenes con el propósito de que pueda orientar a las personas y que compartan una misma meta, como han hecho todas las historias de los orígenes, pero con la particularidad de que el objetivo consiste en aplicarla al mundo globalizado de nuestros días.

En mi caso, el empeño de enseñar la historia del universo se inició en 1989. En 1991, y con el fin de describir lo que me proponía, empecé a utilizar la expresión «gran historia».[4] Sin embargo, a medida que fueron perfilándose los contornos de esta narrativa comprendí que en realidad lo que estaba haciendo era despejar las líneas maestras de una emergente historia global de los orígenes. Hoy, la gran historia es ya una asignatura que se imparte en universidades de muchas partes del mundo, y gracias al Big History Project también se enseña en miles de institutos.

Para lidiar con los serios desafíos globales que nos plantea el siglo XXI, y aprovechar al mismo tiempo las oportunidades que nos brinda, vamos a necesitar esta clase de conocimientos. Lo que me propongo conseguir con el presente libro es aportar una versión actualizada de tan vasta, compleja, bella y estimulante historia.

INTRODUCCIÓN

«Las formas que vienen y van —y de las cuales tu cuerpo no es sino un ejemplo— son los destellos de mis danzantes miembros. Si en todo me conoces, ¿qué puedes temer?»

Discurso imaginario del dios hindú Shiva,
extraído del libro *El héroe de las mil caras*,
de Joseph Campbell

«Por más imposibles que puedan parecer todos estos acontecimientos, es muy probable que tuvieran las mismas perspectivas de verificación que aquellos que pudieron haberse materializado y que aquellos otros que jamás ocurrieron y que nadie juzgó nunca factibles.»

James Joyce, *Finnegans Wake*

Si llegamos a este universo no es por propia elección, y tampoco dependen de nuestra voluntad el tiempo ni el lugar. Durante unos breves instantes, como cósmicas luciérnagas, viajaremos con otros seres humanos, con nuestros padres, con nuestras hermanas y hermanos, con nuestros hijos, con nuestros amigos y nuestros enemigos. También viajaremos junto a otras formas de vida —desde bacterias hasta babuinos—, en compañía de peñascos y océanos, de auroras, de lunas y de meteoritos, escoltados por planetas y estrellas, por cuarks, fotones, supernovas y agujeros negros, familiarizados con babosas y teléfonos móviles, y rodeados de una inmensa cantidad de espacio vacío. Este desfile es denso, colorido, cacofónico y misterioso, y pese a que nosotros, los humanos,

abandonemos el mundo de los vivos, la procesión continuará marchando. En un futuro lejano, otros viajeros se unirán a la rúa y otros la abandonarán. Al final, la procesión empezará a perder integrantes y menguará. Dentro de miles de millones de años, el desfile se desvanecerá como los espectros al amanecer y se disolverá en el océano de energía del que surgió originariamente.

Pero ¿en qué consiste realmente esta abigarrada muchedumbre con la que viajamos? ¿Qué lugar ocupamos en la formación? ¿De dónde partió el séquito, qué rumbo lleva y cómo desaparecerá finalmente?

En la actualidad, los seres humanos nos hallamos en mejores condiciones que nunca para referir con acierto la historia de esa comitiva. Podemos determinar con notable exactitud qué es lo que se agazapa ahí afuera, a miles de millones de años luz de la Tierra, y podemos narrar qué sucedía en el universo hace otros tantos miles de millones de años. Y esto se debe a que ahora disponemos de muchas más piezas del rompecabezas del saber que antes, lo que hace que nos resulte mucho más fácil representarnos el aspecto que podría tener la imagen de conjunto. Esto no es baladí, ya que no solo constituye un logro asombroso sino también extremadamente reciente. De hecho, muchos de los fragmentos de la historia de nuestro origen han encontrado acomodo en el retablo general en los últimos cuarenta o cincuenta años.

Si podemos elaborar esta inmensa cartografía de nuestro universo y su pasado es en parte gracias a nuestro gran cerebro, y también porque, como todos los organismos que disponen de él, utilizamos ese órgano para generar toda una serie de mapas internos del mundo. Estos mapas nos proporcionan una especie de realidad virtual que nos ayuda a orientarnos. No podemos ver directamente el mundo en todo su detalle: eso requeriría disponer de un cerebro del tamaño del universo entero. Sin embargo, lo que sí podemos hacer es crear mapas sencillos de la realidad, aunque esta se revele de una complejidad formidable. Y sabemos que esas cartas reflejan fielmente ciertos aspectos importantes del mundo

real. El plano del metro de Londres hace caso omiso de la mayor parte de las curvas y giros del trazado, pero aun así resulta utilísimo a los millones de viajeros que deben desplazarse por la ciudad. Este libro ofrece un equivalente al plano del metro londinense, pero aplicado al universo.

El elemento que determina que los seres humanos se diferencien del resto de las especies dotadas de cerebro es el lenguaje, un instrumento comunicativo extraordinariamente potente que nos permite no solo compartir nuestros particulares mapas del mundo, sino generar de este modo un sistema cartográfico mucho más amplio y detallado que el que podría crear el cerebro de un único individuo. Compartir nuestros mapas individuales nos permite poner en común la información de que disponemos y cotejar los datos y referencias de nuestros mapas con millones de mapas ajenos. De este modo, cada grupo de seres humanos construye una peculiar comprensión del mundo en la que confluyen las intuiciones, las ideas y los pensamientos acumulados a lo largo de varios miles de años por un sinfín de generaciones. Por medio de este proceso de aprendizaje colectivo, a lo largo de los doscientos mil años de nuestra existencia como especie, los seres humanos hemos logrado reunir, píxel a píxel, una larga serie de mapas del universo. Esto significa que una pequeña parte del universo está empezando a contemplarse a sí misma. Es como si el universo estuviera entreabriendo lentamente un ojo tras una prolongada noche de sueño. Ahora ese ojo está empezando a ver cada vez más cosas, gracias al intercambio global de ideas e información, al rigor y precisión de la ciencia moderna, a los nuevos instrumentos de que dispone la investigación (ya sean aceleradores de partículas capaces de fragmentar el átomo u observatorios espaciales), y a la colosal potencia de cálculo de las recientes redes de ordenadores.

La historia que nos transmiten estos mapas es la más inmensa y formidable que pueda imaginarse.

De niño era incapaz de comprender nada si no encontraba la manera de situar el nuevo dato en alguna clase de mapa. Como muchísimas otras personas, me costaba establecer conexiones entre las diversas áreas de estudio que debía asimilar. La Literatura no tenía nada que ver con la Física, era incapaz de advertir vínculo alguno entre la Filosofía y la Biología; entre la Religión y las Matemáticas, entre la Economía y la Ética... Yo seguía buscando un marco conceptual, una especie de mapamundi con los distintos continentes e islas del conocimiento humano. Quería alcanzar un estado que me permitiera comprender cómo encajaban entre sí todos esos campos tan heterogéneos. Los relatos tradicionales de la religión nunca consiguieron aclararme las cosas porque, al haber pasado parte de mi infancia en Nigeria, desde muy temprana edad había comprobado que las soluciones que ofrecen las distintas religiones para comprender el origen del mundo tal y como lo conocemos no solo suelen ser muy dispares, sino que muy a menudo se revelan también contradictorias.

En la actualidad, el mundo globalizado en el que vivimos está asistiendo al surgimiento de un nuevo marco de comprensión de la realidad. Miles de personas de una multitud de disciplinas académicas y un gran número de países se están volcando colectivamente en su elaboración, desarrollo y difusión. La vinculación de todas esas intuiciones puede ayudarnos a ver cosas que no hay modo de advertir si el observador permanece encerrado en los límites de un único campo de conocimiento. El establecimiento de esos puentes interdisciplinares nos permite contemplar el mundo desde la cima de una cordillera, liberándonos de la reducida visión que se tiene a ras de suelo. ¡Gracias a ello podemos observar los lazos que unen los diversos paisajes del conocimiento académico, lo cual nos permite a su vez ahondar en los grandes temas de interés científico, como la naturaleza de la complejidad, el carácter de la vida e incluso la esencia de nuestra propia especie! A fin de cuentas, hoy el estudio de los seres humanos se lleva a cabo mediante un gran número de lentes

disciplinares distintas (Antropología, Biología, Fisiología, Primatología, Psicología, Lingüística, Historia, Sociología...), pero también es cierto que esa misma especialización hace muy difícil que un solo individuo tenga la perspectiva necesaria para abarcar de un vistazo la totalidad del género humano.

La búsqueda de una historia de los orígenes capaz de engarzar en un lazo causal común los diferentes tipos de conocimiento es tan antigua como la propia humanidad. Una de las imágenes que más me gusta evocar es la de un grupo de personas de hace cuarenta mil años sentadas alrededor de una hoguera al ponerse el sol. Me las imagino instalados en la orilla meridional del lago Mungo, en la Región de los Lagos Willandra, en Nueva Gales del Sur —ya que esta es justamente la zona de Australia donde se han encontrado los restos humanos más antiguos del mundo—. Actualmente, ese territorio está habitado por las tribus de los paakantji, los ngyiampaa y los mati mati, pero sabemos que sus antepasados se establecieron en esta región al menos durante cuarenta y cinco mil años.

En 1992, los restos de un lejano pariente de los aborígenes australianos (conocido con el nombre de Mungo 1), descubierto por un equipo de arqueólogos en 1968, fueron finalmente devueltos a los integrantes contemporáneos de su comunidad de origen. Se trataba de una mujer joven cuyo cadáver había sido parcialmente sometido a un proceso de cremación.[1] A solo medio kilómetro de distancia se encontraron los vestigios de otro individuo (identificado como Mungo 3), probablemente un hombre, fallecido a los cincuenta años. Padecía artritis y una avanzada erosión de las piezas dentarias —es muy probable que como consecuencia del hábito de desgajar fibras vegetales con los dientes para fabricar redes o cuerdas—. Su cuerpo fue enterrado en su día con todo cuidado, lo que indica un perceptible sentimiento de veneración, ya que además sus despojos fueron rociados con polvo de ocre rojo (una sustancia que hubo de ir a buscarse a doscientos kilómetros del lugar del sepelio). En noviembre de 2017, el Hombre de Mungo volvió a descansar en el lago Mungo.

Estos dos especímenes humanos murieron hace unos cuarenta mil años, es decir, en una época en la que los Lagos Willandra, actualmente secos, estaban llenos de agua, peces y crustáceos, circunstancia que los convertía en obligado punto de reunión de muchas aves y otros animales —lo cual, a su vez, ofrecía a los habitantes de ese período la posibilidad de cazar o tender trampas —.[2] En esos años en que la zona rebosaba de energía se vivía magníficamente bien a orillas del lago Mungo. En las conversaciones a media luz que imagino que debían desarrollarse en torno a la hoguera hay siempre chiquillos de ambos sexos, hombres y mujeres de edad avanzada, padres, abuelos —envueltos en algunos casos en pieles de animales— y bebés protegidos en su cuna. A orillas del lago, los más pequeños juegan a perseguirse unos a otros, mientras los adultos dan buena cuenta de la comida, a base de mejillones, pescado fresco, langostas y carne de ualabí. Poco a poco, la charla cambia de sesgo y comienza a discurrir por derroteros más serios, lo que permite a uno de los personajes más ancianos tomar las riendas de la tertulia. Como suele suceder en las largas jornadas veraniegas y las frías noches de invierno, las personas mayores disfrutan contando las historias que aprendieron de jóvenes de labios de sus antepasados y maestros. Y además suelen hacer exactamente el tipo de preguntas que siempre me han fascinado: ¿cómo llegó a formarse el paisaje, con sus colinas y esteros, sus valles y sus quebradas? ¿De dónde vienen las estrellas? ¿Cuándo aparecieron los primeros seres humanos y de dónde surgieron? ¿O acaso han estado siempre aquí? ¿Estamos emparentados con los lagartos monitor, los ualabíes y los emúes? (Y de hecho, la respuesta tanto de las gentes del lago Mungo como de los modernos científicos a esta última pregunta es un rotundo «¡Sí!».) La cuestión que aquí nos interesa se resume en que lo que están haciendo los narradores de ese antiguo conciliábulo a la luz de la lumbre es simplemente dar una lección de historia, es decir, referir los relatos que les han sido transmitidos y

que explican que la creación del mundo se produjo como consecuencia de la intervención de unas fuerzas y unos seres extremadamente poderosos en un pasado muy lejano.

Protagonistas de muchísimas de las noches y días de la tribu, sus narraciones exponen las ideas maestras de los grandes paradigmas de las gentes del lago Mungo. Son representaciones de largo recorrido, nociones llamadas a perdurar en el tiempo. Sus límites y contornos encajan hasta constituir un vasto mosaico de informaciones sobre el mundo. En algunos casos, es posible que los chiquillos que las escuchan consideren que ciertos pasajes de esas narrativas son demasiado complejos y sutiles y que por ello no alcancen a entenderlos a la primera. Sin embargo, siempre tienen ocasión de escucharlas una y otra vez, y en versiones distintas, de modo que al final se familiarizan con su contenido y con los profundos conceptos que encierran. De este modo, al ir creciendo, los relatos quedan grabados en su memoria. Terminan por conocerlos en detalle y por ello mismo logran apreciar tanto su belleza como sus más sutiles pormenores y significados.

Al hablar de estrellas, de paisajes, de wombats, de ualabíes y del mundo de sus antepasados, los maestros del grupo trazan las grandes líneas de un mapa de conocimiento común que muestra a los miembros del clan qué lugar ocupan en el universo, un universo que no solo es abigarrado y hermoso, sino que de vez en cuando también puede resultar aterrador: esto es lo que sois; de aquí venís; estos son los seres que existían antes de que vosotros nacierais; este es el todo del que formáis parte y cuyas dimensiones os harán cobrar conciencia de vuestra pequeñez; y estos son los compromisos y los desafíos que implica vivir en una comunidad de personas iguales a vosotros. Estos relatos tienen mucha fuerza porque son creídos. Hay algo en ellos que suena a verdadero porque su fundamento reside en el saber más avanzado, en una sabiduría transmitida por nuestros más remotos antepasados a lo largo de muchas generaciones. Se trata de unas narrativas cuya exactitud, verosimilitud y coherencia han sido comprobadas una y otra vez,

recurriendo para ello a un complejo conjunto de conocimientos relacionados con la gente, las estrellas, los accidentes geográficos, las plantas y los animales con los que la comunidad de los mungo, sus ascendientes y sus vecinos estaban familiarizados.

Todos podemos beneficiarnos de los mapas trazados y elaborados por nuestros antepasados. El gran sociólogo francés Émile Durkheim insistió siempre en la idea de que los mapas que se ocultan en lo más recóndito de las historias sobre los orígenes y las doctrinas religiosas eran elementos fundamentales para la percepción de nuestra identidad. Sin ellas, argumentaba, la gente podía caer en una suerte de desesperación y tener una sensación de carencia de sentido tan profunda que podía llevarla al suicidio. En consecuencia, no tiene nada de extraño que casi todas las sociedades conocidas hayan considerado que las historias sobre los orígenes debían ocupar un lugar central en sus respectivos sistemas educativos. En los grupos humanos de la era paleolítica, los estudiantes aprendían esos relatos originarios de boca de sus mayores, exactamente igual que los eruditos de períodos posteriores, que también se impregnaron de las narrativas más significativas del cristianismo, el islam y el budismo en las universidades de París, Oxford, Bagdad y Nalanda.

Lo curioso, sin embargo, es que la educación laica moderna carece de una historia del origen fiable y capaz de unir bajo un mismo vínculo común la totalidad de los campos del conocimiento de que disponemos. Y precisamente esto podría contribuir a identificar las razones que determinan que, en el mundo actual, la polimorfa sensación de desconcierto, división y falta de rumbo que Durkheim describiera pueda advertirse de un modo tan manifiesto en todas partes, ya sea en Lima, en Delhi, en Lagos o en Londres. El problema es que en un mundo en el que imperan las conexiones globales, el número de historias del origen que compiten entre sí y que tratan de ganarse la confianza y la atención de la gente es tan elevado que sus diferentes contenidos terminan por interferirse y anularse unos a otros. Esto ha determinado que la mayoría de los

educadores actuales se centren en una o varias partes del relato originario general y que a sus alumnos no les quede más remedio que asimilar las características del mundo en el que viven recorriendo, uno a uno, los compartimentos estancos de las diversas disciplinas académicas. Actualmente las personas aprenden cosas de las que nuestros antepasados del lago Mungo jamás oyeron hablar, desde el cálculo matemático a la historia de la modernidad, pasando por las fórmulas precisas para redactar un código informático. Sin embargo, a diferencia de los pueblos del lago Mungo, a nosotros rara vez se nos anima a reunir todos esos conocimientos en un único relato coherente, un poco al modo de los viejos globos terráqueos de las aulas de otra época que aunaban miles de mapas locales en una sola representación del mundo. Y este hecho tiene una clara consecuencia, pues nos obliga a conformarnos con una comprensión fragmentaria tanto de la realidad como de la comunidad humana a la que todos pertenecemos.

La historia moderna de los orígenes

Y aun así..., aunque sea de manera fragmentada e incompleta, está empezando a aflorar una historia moderna de los orígenes. A semejanza de los relatos que se contaban a orillas del lago Mungo, la historia moderna de los orígenes también es una recopilación del saber de nuestros antepasados, y en ella confluyen del mismo modo unos saberes tan contrastados y confirmados que han conseguido superar la prueba del tiempo y revelarse válidos para un gran número de generaciones a lo largo de muchos milenios.

Se trata, evidentemente, de una elaboración muy distinta a la de la inmensa mayoría de las historias tradicionales del origen. Esto se debe en parte a que no es obra de una región o una cultura en particular, sino resultado de la labor de una comunidad global de más de siete mil millones de seres humanos, lo que significa que se nutre de conocimientos procedentes de los cuatro puntos cardinales.

Es una historia de los orígenes que abarca la totalidad del género humano contemporáneo y que se apoya en las tradiciones globales de la ciencia moderna.

Otro de los rasgos que distingue la historia moderna de los orígenes de muchas de las historias tradicionales de los orígenes es que la actual carece de un Dios creador, aunque cuenta en cambio con energías y partículas tan exóticas como los panteones de la mayoría de esas historias originarias de inspiración ancestral. Y a semejanza de las teorías sobre el origen elaboradas por el confucianismo o el budismo primitivo, la historia moderna se ciñe exclusivamente al universo que existe, sin más. Toda eventual sensación de sentido emana de nosotros, los seres humanos, no del universo. «¿Qué significado tiene el universo?», se preguntaba a mediados del siglo pasado Joseph Campbell, un estudioso de los mitos y las religiones. Su respuesta era una pregunta retórica: «¿Qué significación tiene una pulga? Se limita a estar ahí, sencillamente, y nuestro propio significado, el de los humanos, es el mismo: que estamos aquí».[3]

El mundo de la historia moderna de los orígenes es menos estable, más turbulento, y bastante más amplio que los mundos que definen muchas de las historias tradicionales de los orígenes. Con todo, son justamente esas cualidades las que constituyen las debilidades y las limitaciones de la historia moderna de los orígenes. Pese a su alcance global, la teoría que está emergiendo es extremadamente reciente, de modo que no solo adolece de cierta tosquedad sino que presenta además algunos de los puntos ciegos que suelen acompañar a cuanto carece de experiencia. Ha surgido en un período muy concreto de la historia humana, lo que hace que las tradiciones del capitalismo moderno, tan dinámicas como potencialmente desestabilizadoras, la estén configurando a su manera. Esto explica que, en muchas de sus variantes, la historia moderna de los orígenes no posea la profunda sensibilidad que muestran, respecto de la biosfera, las historias de los orígenes de los pueblos indígenas dispersos por el mundo.

El universo de la historia moderna de los orígenes se encuentra en permanente estado de agitación, es móvil, está en constante evolución y tiene unas dimensiones inmensas. El geólogo Walter Alvarez nos recuerda su descomunal tamaño preguntándose cuántas estrellas contiene. La mayor parte de las galaxias cuentan en su haber unos cien mil millones de estrellas, y el número de galaxias del universo asciende, como mínimo, a una cifra del mismo orden. Esto significa que el universo alberga (tomemos aire) nada menos que 10.000.000.000.000.000.000.000 (10^{22}) de estrellas.[4] Las más recientes observaciones, llevadas a cabo a finales de 2016, sugieren que quizá haya aún más galaxias en el cosmos, de modo que nada nos impide añadir unos cuantos ceros más a la gigantesca cifra anterior. De hecho, nuestro sol no es sino un miembro perfectamente corriente de tan inabarcable muchedumbre.

La historia moderna de los orígenes es una obra en construcción. No solo se le están añadiendo secciones, sino que también tiene apartados que aún no han sido comprobados y depurados, y aún no se ha retirado el andamiaje y los residuos generados durante su creación. Todavía está salpicada de lagunas, de modo que nunca llegará a perder esa aureola de misterio y respetabilidad que caracteriza a todas las historias de los orígenes. No obstante, en las últimas décadas, la comprensión del universo en que vivimos ha adquirido una densidad muy superior a la que tuvo en cualquier época pasada, lo que podría acentuar todavía más el halo de misterio que la envuelve, porque, como dijo en su día el filósofo francés Blaise Pascal: «El conocimiento es como una esfera: cuanto mayor sea su volumen, mayor será también su contacto con lo desconocido».[5] Sin embargo, pese a todas sus imperfecciones e incertidumbres, es preciso conocer el relato de la historia moderna de los orígenes, pues compartimos con los pueblos del lago Mungo esa necesidad de acceder a la historia de nuestros comienzos. La historia moderna del inicio de lo real nos transmite un legado que es común al conjunto de los seres humanos, y por ello mismo puede

prepararnos para los enormes retos y oportunidades que todos nosotros debemos afrontar en este crucial momento de la historia del planeta Tierra.

Uno de los elementos medulares del relato contemporáneo de los orígenes es la idea del incremento de la complejidad. ¿Cómo surgió nuestro universo, y cómo generó ese abigarrado desfile de cosas, fuerzas y seres del que nosotros mismos formamos parte? La verdad es que no sabemos a ciencia cierta de dónde procede el universo ni si existía ya algo antes de que apareciera. Sin embargo, de lo que sí estamos seguros es de que cuando nuestro universo surgió de una vasta espuma de energía, su estructura era sumamente simple. De hecho, la sencillez sigue siendo su principal rasgo. Al fin y al cabo, la mayor parte de nuestro universo es un espacio frío, oscuro y vacío. Aun así, en algunos entornos muy particulares e inhabituales —como el de nuestro propio planeta— se dieron en su momento las perfectas condiciones «Ricitos de Oro» (o condiciones *Goldilocks*),* es decir, existieron ambientes ni demasiado calientes ni demasiado fríos y ni demasido densos ni demasiado fluidos, lo que los hizo idóneos para la evolución de la complejidad (como ocurre con la sopa del cuento de *Ricitos de Oro y los tres osos*).[6] En el transcurso de innumerables millones de años, en estos entornos Ricitos de Oro empezaron a surgir elementos cada vez más complejos, elementos con cada vez más partes móviles y con relaciones internas progresivamente más intrincadas. Pero no caigamos en el error de suponer que los elementos complejos son necesariamente mejores que los sencillos. La complejidad es algo sumamente interesante para los seres humanos precisamente porque nosotros mismos participamos de ella y la dinámica sociedad global en la que vivimos actualmente es una de las realidades de mayor complejidad de cuantas conocemos. Por consiguiente, el mero hecho de comprender cómo llegaron a surgir las cosas complejas y cuáles fueron las condiciones Ricitos de Oro que hicieron posible su aparición es una magnífica forma de entender tanto nuestra propia realidad como la del mundo en el que hoy vivimos.

Las cosas más complejas emergieron en unos puntos de transición clave, y en este libro llamaré «umbrales» a las más importantes de esas inflexiones. Los umbrales son los factores que dan forma a la compleja narrativa de la historia moderna de los orígenes. Son los elementos que indican la presencia de un punto de inflexión de gran calado, es decir, de un momento en el que las cosas hasta entonces existentes experimentaron una drástica reorganización o sufrieron alteraciones de alguna índole, lo que a su vez generó la aparición de propiedades nuevas o «emergentes» e hizo surgir cualidades que nunca antes se habían materializado. En el universo primitivo no había estrellas ni planetas ni organismos vivos. Sin embargo, poco a poco empezaron a brotar objetos enteramente nuevos. Las estrellas surgieron de la aglutinación de átomos de hidrógeno y helio, en los pulsátiles núcleos de las estrellas agonizantes se crearon nuevos elementos químicos, los grumos de hielo y polvo que se formaron a partir de esos nuevos elementos químicos dieron lugar al nacimiento de los planetas y los satélites, y las primeras células vivas aprovecharon los ricos entornos químicos de los planetas telúricos para evolucionar y multiplicarse. Los seres humanos somos parte integrante de esta historia, pues somos producto de la evolución y la diversificación de la vida en el planeta Tierra, aunque también es cierto que en el curso de nuestra breve pero notabilísima historia hemos creado tantas formas de complejidad, y tan enteramente nuevas, que hoy tenemos la impresión de dominar los cambios en nuestro mundo. La aparición de algo nuevo y más complejo que todo lo precedente, de algo dotado de propiedades novedosas y emergentes, parece siempre tan milagroso como el nacimiento de un bebé, pues el universo tiende a progresar hacia situaciones de menor complejidad y mayor desorden. En último término, esa creciente propensión al desorden (lo que los científicos denominan «entropía») acabará por prevalecer y el universo se convertirá en una especie de gran desbarajuste aleatorio carente de pautas o estructuras. Pero esto será en un futuro muy, muy lejano.

Entretanto, todo parece indicar que nos hallamos en un universo joven y vigoroso, pletórico de creatividad. El nacimiento del universo —nuestro primer umbral— es tan milagroso como como cualquier otro de los umbrales que jalonan nuestra historia moderna de los orígenes.

CRONOLOGÍA

Esta cronología muestra algunas de las fechas fundamentales del relato moderno de los orígenes sirviéndose tanto de datos absolutos aproximados como de cifras relativas —lo que nos permite operar, por ejemplo, como si el universo hubiera surgido hace 13,8 años y no hace 13.800 millones de años—. Este segundo enfoque «reducido» facilita hacerse una idea de las dimensiones cronológicas del relato. A fin de cuentas, cuando la selección natural diseñó nuestra mente, no consideró necesario dotarla de la capacidad de operar con cifras de varios miles de millones de años, así que esta cronología abreviada nos será más fácil de manejar.

En la mayoría de los casos, la determinación de las fechas que aquí se ofrecen para situar los acontecimientos ocurridos en períodos de tiempo superiores a unos cuantos miles de años es bastante reciente: de hecho, solo han podido establecerse en los últimos cincuenta años, gracias a las modernas tecnologías cronométricas de entre las cuales destaca, por su importancia, la de la datación radiométrica.

Acontecimiento	Fecha absoluta aproximada	Fecha dividida por mil millones
UMBRAL 1: Big Bang, origen de nuestro universo.	Hace 13.800 millones de años.	Hace 13 años y 8 meses.
UMBRAL 2: Empiezan a brillar las primeras estrellas.	Hace 13.200 millones de años (?).	Hace 13 años y 2 meses.
UMBRAL 3: En el núcleo de las estrellas agonizantes se forman	Lapso de tiempo que abarca, de forma ininterrumpida, desde el	Lapso de tiempo que abarca, de forma ininterrumpida, desde el

nuevos elementos químicos.	inicio del Umbral 2 hasta nuestros días.	inicio del Umbral 2 hasta nuestros días.
UMBRAL 4: Formación de nuestro sol y su sistema solar.	Hace 4.500 millones de años.	Hace 4 años y 6 meses.
UMBRAL 5: Aparición de los primeros seres vivos en la Tierra.	Hace 3.800 millones de años.	Hace 3 años y 9 meses.
La Tierra se puebla con los primeros organismos de grandes dimensiones.	Hace 600 millones de años.	Hace 7 meses.
Un asteroide borra de la faz del planeta a los dinosaurios.	Hace 65 millones de años.	Hace 24 días.
El linaje de los homininis se desgaja de la rama de los chimpancés.	Hace 7 millones de años.	Hace 2 días y medio.
Homo erectus.	Hace dos millones de años.	Hace 17 horas.
UMBRAL 6: Primeras pruebas de la existencia de nuestra especie: *Homo sapiens*.	Hace 200.000 años.	Hace 100 minutos.
UMBRAL 7: Final de la última glaciación y comienzo del Holoceno. Primeros signos de actividad agrícola.	Hace 10.000 años.	Hace 5 minutos.
Primeros vestigios de ciudades, estados y civilizaciones agrarias.	Hace 5.000 años.	Hace 2,5 minutos.
Florecimiento de los imperios romano y de la dinastía Han.	Hace 2.000 años.	Hace 1 minuto.
Empiezan a crearse vínculos entre las distintas regiones del mundo.	Hace 500 años.	Hace 15 segundos.

UMBRAL 8: Inicio de la revolución de los combustibles fósiles.	Hace 200 años.	Hace 6 segundos.
Principio de la Gran Aceleración: el ser humano se posa en la superficie de la luna.	Hace 50 años.	Hace 1,5 segundos.
UMBRAL 9 (?): ¿Posibilidad de un orden mundial sostenible?	¿De aquí a 100 años?	Dentro de tres segundos.
Muerte del sol.	Dentro de 4.500 millones de años.	Dentro de 4 años y 6 meses.
El universo se apaga poco a poco, hasta quedar totalmente a oscuras. Triunfo de la entropía.	Dentro de una incontable cantidad de millones de años.	Dentro de miles y miles de millones de años.

PRIMERA PARTE

EL COSMOS

Capítulo 1

EN EL PRINCIPIO: UMBRAL 1

> «Para crear de la nada una tarta de manzana primero hay que inventar el universo.»
>
> Carl Sagan, *Cosmos*

> «Así debe haber sido después del nacimiento de la sencilla luz primera,
> En aquel original ruedo en el que los caballos, hechizados, abandonaban a paso lento el cálido refugio
> Del establo verde entre ecos de relinchos, Hacia los benditos campos.»
>
> Dylan Thomas, «Fern Hill»

LA HISTORIA DE LOS ORÍGENES ARRANCA A EMPUJONES

Si existe alguna tarea imposible es practicar *bootstrapping*: levantarse uno mismo por los aires tirando muy, pero que muy fuerte, de nuestras propias botas. Esta idea entró en la jerga informática (a través de términos como *booting*, «iniciar», o *rebooting*, «reiniciar») como respuesta a la necesidad de describir la forma en que los ordenadores se levantan de entre los muertos y proceden a cargar las instrucciones que precisan para saber qué pasos deben dar a continuación. Como es obvio, en sentido literal levantarse a uno mismo de ese modo es imposible, pues para elevar algo hay que disponer de un punto en que afianzarse. «Dadme una

palanca y un punto de apoyo y moveré el mundo», afirmó en su día el filósofo griego Arquímedes. Ahora bien, ¿dónde pudo apoyarse la creación de un nuevo universo? ¿Cómo se «inicia» un universo? O si se prefiere: ¿cuál es el punto de partida de la historia de los orígenes que refiere el surgimiento de dicho universo?

El trabajoso inicio, y desde cero, de todas las historias de los orígenes resulta casi tan complejo como la inicialización de los universos, y ambas cosas son comparables al ejercicio del *bootstrapping*. Una de las posibles formas de abordar la cuestión consiste en hacer desaparecer el problema del «comienzo de todo» y asumir que el universo siempre ha estado ahí. De ese modo no se necesita ningún *bootstrapping*. Son muchas las historias de los orígenes que han optado por esta opción. Y lo mismo puede decirse de la mayoría de los astrónomos contemporáneos, incluidos los que a mediados del siglo XX defendían la teoría de la creación continua. Este planteamiento sostiene que, a gran escala, el universo siempre ha tenido el mismo aspecto que hoy. Muy parecida, con sutiles diferencias, es la idea de que sí hubo un instante de creación marcado por la presencia de grandes fuerzas o seres sobrenaturales dedicados a recorrer el infinito creando cosas, pero que desde entonces no se han producido cambios dignos de mención. Es posible que los ancianos del lago Mungo concibieran de este modo el universo y que sostuvieran que, una vez fraguado —por obra de sus antepasados—, el cosmos adquirió una forma muy parecida a la actual. Isaac Newton consideraba que Dios era la «causa primera» de todas las cosas y que su poder se hallaba presente en la totalidad del espacio. Esto explica que Newton pensara que el conjunto del universo no había experimentado excesivas transformaciones. En una ocasión escribió que el universo era «el aparato sensorial de un Ser incorpóreo, vivo e inteligente».[1] A principios del siglo XX, Einstein estaba tan convencido de que a gran escala el universo era invariable que añadió a su teoría de la relatividad una constante para que predijera la estabilidad del universo.

¿Puede considerarse satisfactoria esta idea de un universo eterno e inalterable? La verdad es que no, sobre todo cuando es preciso introducir subrepticiamente un creador que arranque el proceso, como en la fórmula: «En el principio era la nada, y entonces Dios hizo...». Es obvio que hay aquí un gazapo lógico, aunque en ocasiones algunas mentes privilegiadas hayan necesitado recorrer un largo camino para comprenderlo con claridad. A los dieciocho años, Bertrand Russell desechó la idea de un dios creador tras leer el siguiente pasaje en la autobiografía de John Stuart Mill: «Mi padre me enseñó que no es posible responder a la pregunta "¿Quién me hizo?", dado que la propia interrogante sugiere enseguida esta otra: ¿Quién hizo a Dios?».[2]

Pero no acaban aquí las incógnitas. Si hay un dios lo bastante poderoso como para concebir y crear un universo, es evidente que ese dios ha de ser necesariamente más complejo que el universo, lo que significa que suponer la existencia de un dios creador equivale a explicar la realidad de un universo de formidable complejidad imaginando la existencia de algo todavía más complejo que se habría limitado a crear el universo a partir de la nada. Alguien podría pensar que esto es hacer trampas.

Los antiguos himnos hindúes que conocemos con el nombre de Vedas se cubren las espaldas: «No había entonces ni existencia ni no-existencia; y tampoco había espacio ni firmamento más allá de él».[3] Quizá todo surgiera de una tensión primordial entre el ser y el no-ser, un tenebroso ámbito que no era algo pero podía llegar a serlo. O tal vez debamos concluir, como sostiene un moderno dicho de los aborígenes australianos, que nada es una nada total.[4] Es una idea un tanto delicada, y hay quien podría considerarla confusa y un poco mística si no fuese porque tiene un asombroso paralelismo con la noción contemporánea, muy arraigada en la física cuántica, de que el espacio nunca se encuentra enteramente vacío, sino repleto de posibilidades.

¿Existe una especie de océano de energía o de sucesos potenciales del que emergen, un poco al modo de las olas o los tsunamis, toda una serie de formas particulares? Este concepto es tan habitual y está tan extendido que resulta tentador pensar que las ideas que elaboramos sobre las causas últimas del comienzo del mundo proceden de nuestras propias experiencias. De hecho, todas las mañanas experimentamos cómo de lo que parece un universo caótico e inconsciente surge un mundo consciente con formas, sensaciones y estructuras. Joseph Campbell explica en uno de sus libros: «Del mismo modo que la conciencia del individuo flota en un océano de oscuridad, a cuyas profundidades desciende con el sueño y del que misteriosamente sale al despertar, en el imaginario mítico el universo brota impetuosamente de una intemporalidad en la que no solo descansa, sino a la que, llegado el momento, regresará para al fin disolverse».[5]

Quizá todo esto resulte excesivamente metafísico. Tal vez la dificultad es de tipo lógico. Stephen Hawking argumentaba que la cuestión del origen es una pregunta mal planteada. Si la geometría del espacio-tiempo es esférica, como sucede en el caso de la Tierra, si bien con más dimensiones, entonces toda interrogación que pretenda averiguar qué existía antes del universo equivale a tratar de hallar el punto de partida de la superficie de una pelota de tenis. Las cosas no funcionan así. El tiempo no tiene un comienzo, del mismo modo que tampoco lo tiene la superficie de la Tierra.[6]

Algunos cosmólogos se sienten atraídos en la actualidad por otro grupo de conceptos que nos retrotraen a la idea de un universo sin principio ni fin. Puede que nuestro universo forme parte de un multiverso infinito en el que constantemente se producen Big Bangs de los que surgen nuevos universos. Eso podría ser cierto, pero hasta el momento no se ha hallado ninguna prueba concluyente de que haya existido un solo Big Bang anterior al nuestro. Todo ocurre como si la creación de nuestro universo hubiese sido tan violenta

que cualquier información sobre la realidad que le dio origen hubiera quedado totalmente borrada. Si existen otras aldeas cosmológicas, hasta ahora no hemos sido capaces de observarlas.

Para ser francos, en la actualidad las respuestas que damos al problema del comienzo originario del cosmos no son mejores que las de cualquiera de las sociedades humanas que nos precedieron. La idea de una «inicialización» del universo sigue presentando todo el aspecto de una paradoja, tanto desde el punto de vista lógico como metafísico. No sabemos cómo fueron las condiciones Ricitos de Oro que permitieron el surgimiento del universo, y tampoco estamos en disposición de explicar esa aparición mejor de lo que lo hizo el novelista Terry Pratchett cuando escribió: «El estado actual del conocimiento puede resumirse de este modo: En el principio no había nada, y luego explotó».[7]

Umbral 1: la inicialización cuántica del universo

La forma de inicialización más ampliamente aceptada en la actualidad es la resumida en la idea del Big Bang. Esta teoría es uno de los principales paradigmas de la ciencia contemporánea, comparable a la noción de selección natural en biología o a la tectónica de placas en geología.[8]

Hasta principios de la década de 1960 no empezaron a aparecer las piezas maestras del relato basado en el Big Bang. Tales piezas empezaron a encajar cuando los astrónomos detectaron por primera vez la radiación de fondo de microondas, es decir, la energía residual que dejó el Big Bang, que todavía se halla presente en todas partes en el universo de nuestros días. Aunque los cosmólogos aún tienen grandes dificultades para comprender en qué momento surgió nuestro universo, lo cierto es que eso no les impide ofrecer un apasionante relato cuyo comienzo se produjo (respiren hondo, la cifra no es pequeña —y solo espero saber expresarla con exactitud —) nada menos que una mil millonésima parte de una mil

millonésima parte de una mil millonésima parte de una mil millonésima parte de una mil millonésima parte del primer segundo posterior a la aparición del universo (es decir, unos 10^{-43} segundos después del instante cero).

En pocas palabras, la narrativa cosmológica puede resumirse del siguiente modo: en su inicio, nuestro universo era un simple punto, más pequeño que un átomo. Esto significa que tenía un tamaño diminuto, pero ¿hasta qué punto? La evolución de la mente de nuestra especie la ha capacitado para trabajar con objetos adaptados a la escala humana, así que nos resulta muy difícil manejar dimensiones minúsculas, aunque tal vez sirva de ayuda saber que en el punto ortográfico que remata esta frase cabría nada menos que un millón de átomos.[9] En el instante en que se produjo el Big Bang, el volumen del conjunto del universo era inferior al de un átomo. En su interior se hallaba contenida toda la energía y la materia que se halla presente en el cosmos actual. Toda. Es una idea formidable, capaz de intimidar a cualquiera, y a primera vista incluso un poco descabellada. Sin embargo, todas las pruebas de que disponemos hasta ahora indican que hace unos 13.820 millones de años ese extraño e ínfimo corpúsculo, de temperatura colosalmente elevada, existió.

Todavía no comprendemos cómo y por qué apareció ese objeto, pero la física cuántica nos dice —y los aceleradores de partículas (que imprimen altísimas velocidades a las entidades subatómicas mediante la aplicación de campos eléctricos o electromagnéticos) nos muestran— que en el vacío es efectivamente posible que de la nada surja algo, aunque la comprensión de esta afirmación exija disponer de una definición muy compleja de la noción de «nada». En la física cuántica moderna resulta imposible determinar de forma precisa la posición y el movimiento de las partículas subatómicas. Esto significa que no hay modo de saber con certeza si una determinada región del espacio está o no vacía, lo que a su vez implica que la vacuidad contiene en sí la posibilidad de que surja

algo en ella. Como ya vimos que sucedía con la «falta de existencia y de no-existencia» de los Vedas hindúes, esta tensión parece haber sido la responsable de la inicialización de nuestro universo.[10]

En la actualidad, damos a ese primer instante de vida del universo el nombre de Big Bang, asimilando ese surgimiento al de un bebé recién venido al mundo, como si al nacer el cosmos hubiera gritado con fuerza. Esta sugerente expresión la acuñó en 1949 el astrónomo inglés Fred Hoyle, quien estaba convencido de que era una idea ridícula. A principios de la década de 1930, cuando comenzó a hablarse de una gran explosión, el astrónomo belga (y sacerdote católico) Georges Lemaître decidió denominar «huevo cósmico» o «átomo primordial» al universo neonato. Los escasos científicos que se tomaron en serio semejante ocurrencia estaban convencidos de que, si albergaba tantísima energía comprimida en su interior, ese átomo primordial debía tener una temperatura inconcebiblemente alta y tenía que haber experimentado una violentísima expansión para liberar toda esa presión. De hecho, la expansión prosigue en nuestros días; como un inmenso muelle que llevara más de trece mil millones de años distendiéndose.

En los segundos y minutos inmediatamente posteriores al Big Bang ocurrieron muchísimas cosas, la más importante de las cuales fue la aparición de las primeras estructuras y pautas interesantes, entidades o energías primordiales con formas y propiedades distintivas no aleatorias. La aparición de algo con cualidades nuevas es siempre mágico. En la historia moderna de los orígenes asistiremos a menudo a este tipo de acontecimientos prodigiosos, pero lo que en un primer momento parece admirable puede resultarlo menos en cuanto comprendemos que tanto el objeto nuevo como sus novedosas cualidades no han salido de la nada. Las cosas nuevas con propiedades hasta entonces desconocidas nacen de cosas que el universo ya contenía y de fuerzas previamente existentes ordenadas de forma original. Es esa nueva organización lo que genera el surgimiento de las propiedades inéditas, del mismo modo que la imagen de los mosaicos puede modificarse con un

simple cambio en la disposición de las mismas teselas. Tomemos el ejemplo de la química. Por regla general tendemos a representar el hidrógeno y el oxígeno como gases incoloros, pero si unimos dos átomos de hidrógeno con uno de oxígeno y los configuramos de un determinado modo obtenemos una molécula de agua. Y si reunimos un gran número de moléculas de ese tipo nos encontraremos frente a una cualidad enteramente nueva que llamamos «acuosa». Cada vez que percibimos una forma o una estructura nuevas dotadas de cualidades igualmente novedosas, lo que en realidad estamos percibiendo es un modo nuevo de organizar cosas preexistentes. La innovación es la emergencia. Y si nos hacemos a la idea de que la emergencia es uno de los personajes clave de nuestra narrativa, es muy probable que le descubramos una personalidad provocativa, misteriosa e impredecible, es decir, el tipo de carácter de quien muestra una clara tendencia a surgir inesperadamente de un rincón oscuro para imprimir al argumento un giro nuevo y sorprendente.

Las primeras estructuras y pautas del universo surgieron precisamente de ese modo, debido a que los objetos y las fuerzas que saltaron de pronto a la palestra como consecuencia del Big Bang se ordenaron de forma nueva y dieron lugar a configuraciones también desconocidas hasta entonces.

En el primer instante que nos ha dejado alguna prueba de su existencia —el surgido apenas una fracción de segundo después del Big Bang—, el universo era una masa de energía pura, aleatoria, indiferenciada y amorfa. Cabría concebir la energía como aquella «potencialidad para que algo suceda», o dicho de otro modo: como la capacidad de hacer o transformar cosas. El átomo primordial contenía una cantidad de energía formidable, ya que su temperatura era de varios millones de grados por encima del cero absoluto. Hubo un primer breve período de expansión enormemente acelerada conocido como «inflación». Esa expansión fue tan rápida que una buena parte del universo pudo salir proyectada a una distancia

inmensa, tan grande que jamás alcanzaremos a verla. Esto significa que cuanto hoy vemos probablemente no es más que una mínima parte del universo.

Una fracción de segundo después, la expansión se ralentizó. Las turbulentas energías del Big Bang empezaron a asentarse, y a medida que la expansión progresaba el magma energético fue dispersándose hasta acabar por diluirse. Las temperaturas medias del cosmos disminuyeron, y se inició así un descenso que se ha mantenido hasta hoy, de modo que en la actualidad la mayor parte del universo apenas supera en 2,76 grados Celsius el cero absoluto. (Llamamos «cero absoluto» a aquella temperatura en la que no hay corpúsculo que muestre la más mínima agitación.) Si no percibimos ese frío glacial es porque contamos con el calor que nos proporciona el sol, que es como la hoguera de campamento que caldea nuestra galaxia.

Las temperaturas extremas del Big Bang tenían la capacidad potencial de materializar prácticamente cualquier cosa. Sin embargo, cuando el termómetro cayó esas posibilidades se redujeron. En la caótica neblina de ese rápido proceso de enfriamiento comenzaron a emerger, como siluetas espectrales, toda una serie de entidades cuyo denominador común era no haber encontrado condiciones de existencia en la arrebatada marmita dela propio Big Bang. Los científicos dan a estos cambios de forma y estructura el nombre de «transiciones de fase». En la vida cotidiana podemos asistir a estas transiciones de fase, por ejemplo, cuando el vapor pierde energía y se convierte en agua (cuyas moléculas se mueven muchísimo menos que las de su versión vaporizada), o al observar el agua transformada en hielo (cuya energía es tan baja que sus moléculas apenas muestran actividad y permanecen casi inertes). El agua y el hielo solo pueden existir como tales en una estrecha franja de temperaturas muy bajas.

Transcurrida la mil millonésima parte de la mil millonésima parte de la mil millonésima parte de la mil millonésima parte del primer segundo posterior al Big Bang, la energía misma experimentó una

transición de fase, puesto que se escindió y dio lugar a cuatro clases de energía totalmente diferentes. En nuestros días conocemos estos cuatro tipos de energía con los nombres de fuerza gravitatoria, fuerza electromagnética, fuerza nuclear fuerte y fuerza nuclear débil. Conviene familiarizarse con sus distintas personalidades porque son las que moldean nuestro universo. La gravedad es poco intensa, pero es capaz de salvar enormes distancias. Además, tiende siempre a atraer las cosas entre sí, de manera que su fuerza se acumula y, bajo sus efectos, el universo tiende a agrandarse. La energía electromagnética puede presentarse en forma negativa o positiva, de modo que a menudo se anula a sí misma. Pese a su escasa fuerza, la gravedad es quien se encarga de configurar el universo a gran escala. Sin embargo, en los planos de la química y la biología, lo que predomina es el electromagnetismo, así que puede decirse que este último es el que mantiene la cohesión y la integridad de nuestros organismos. Las tercera y cuarta energías fundamentales reciben el poco estimulante nombre de fuerzas nucleares fuerte y débil. Operan a distancias ínfimas, así que su importancia se revela a escala subatómica. Los seres humanos no las percibimos ni experimentamos de manera directa, pero conforman todos los aspectos de nuestro mundo porque determinan qué sucede en las más recónditas profundidades del átomo.

Es posible que existan otros tipos de energía. En la década de 1990, tras realizar nuevas mediciones del índice de expansión del universo, los científicos advirtieron que esa dilatación continúa su curso. En la actualidad, y tomando como base una idea propuesta por Einstein, muchos físicos y astrónomos empiezan a argumentar que quizá haya un tipo de fuerza antigravitatoria presente en la totalidad del espacio y que, dada su naturaleza, su potencia se incrementa con la expansión cósmica. En nuestros días, la masa de esa energía podría representar nada menos que el 70 % de la totalidad de la del universo. No obstante, y por más que esté empezando a dominar el cosmos, todavía no alcanzamos a comprender en qué consiste dicha energía ni cómo funciona, así que

los físicos la denominan «energía oscura». Este término es en realidad un espacio libre que deberá rellenarse cuando se despeje la incógnita. Pero conviene no perder de vista ese hueco destinado a futuras certezas porque la comprensión de la energía oscura es uno de los mayores desafíos de la ciencia contemporánea.

La materia apareció antes de transcurrido un segundo desde el Big Bang. La materia es todo aquello que la energía moviliza o traslada de un sitio a otro. Hasta hace apenas un siglo, tanto los científicos como los filósofos consideraban la materia y la energía como cosas diferentes, pero hoy sabemos que en realidad la materia es una forma de energía altamente comprimida. Ya de muy joven Albert Einstein demostró este extremo en un célebre artículo que publicó en 1905. La fórmula que allí expuso —la energía (E) es igual a la masa (m) multiplicada por la velocidad de la luz (c) al cuadrado (o lo que es lo mismo: $E = mc^2$)— nos indica cuánta energía se encuentra comprimida en el interior de una determinada cantidad de materia. Para hacernos una idea de cuánta energía contiene una pequeña porción de materia no basta con multiplicar la masa de esa materia por la velocidad de la luz (superior a mil millones de kilómetros por hora), sino por la velocidad de la luz multiplicada por sí misma. Esto arroja una cifra colosal, de modo que si descomprimimos un minúsculo trozo de materia, lo que se obtiene es una cantidad de energía enorme. Esto es precisamente lo que sucede cuando estalla una bomba de hidrógeno. En el universo primitivo se produjo exactamente lo contrario. En el principio había una enorme cantidad de energía comprimida en minúsculos volúmenes de materia, como motas de polvo en una inmensa bruma de energía. Resulta asombroso que los humanos hayamos logrado recrear esas energías durante un breve período de tiempo, en el Gran Colisionador de Hadrones instalado en las inmediaciones de Ginebra. Y sí, gracias a ello hemos podido comprobar que empiezan a surgir partículas de ese hirviente océano de energía.

Y todavía no hemos pasado del primer segundo...

Las primeras estructuras

En el interior de esta caótica bruma de energía surgida inmediatamente después del Big Bang empezaron a aparecer diversas formas y estructuras. Aunque la niebla de energía no se disipara, los elementos que brotaron de su interior nos proporcionaron la forma y la trama de nuestra historia de los orígenes. Entre esas disposiciones o pautas corpusculares las había llamadas a perdurar miles de millones de años y otras de existencia efímera, reducida a una simple fracción de segundo, pero ninguna de ellas se ha conservado. Son invariablemente evanescentes, como olas en la superficie de los mares. La primera ley de la termodinámica nos dice que ese océano de energía sigue presente, que se mantiene. Y al mismo tiempo, la segunda ley de la termodinámica nos indica que todas las formas que puedan surgir, sean cuales sean, acabarán disolviéndose en el océano de energía del que brotaron. Esas formas, como los movimientos de una danza, no se conservan.

En el primer segundo tras el Big Bang irrumpen en el universo diferentes estructuras y formas. Pero ¿por qué? ¿Por qué no es el universo un simple flujo aleatorio de energía? Esa es una pregunta fundamental.

Si nuestra historia de los orígenes incluyera a un dios creador, sería muy fácil explicar todas esas estructuras. Podríamos limitarnos a suponer (como hacen muchas historias de los orígenes) que ese dios prefirió la organización al caos. Aun así, la mayoría de las versiones sobre los orígenes no aceptan ya la idea de un dios creador porque la ciencia contemporánea no ha encontrado ninguna prueba directa de su existencia. Muchas personas han experimentado o percibido a los distintos dioses, pero los relatos de esas revelaciones no solo son diversas y contradictorias, sino que no hay forma de reproducirlas a voluntad. Son tan maleables, difusas y subjetivas que no hay manera de utilizarlas como base probatoria científica y objetivable.

Por consiguiente, la historia moderna de los orígenes debe encontrar otras formas de explicar la aparición de formas y estructuras. Y no resulta fácil, dado que la segunda ley de la termodinámica nos confirma que, antes o después, todas esas estructuras acabarán por desaparecer. Así lo expresaba el físico austríaco Erwin Schrödinger: «Reconocemos ahora que esta ley fundamental de la física no es más que la tendencia natural de las cosas a acercarse al estado caótico (la misma tendencia que presentan los libros de una biblioteca o las pilas de papeles y manuscritos sobre un escritorio), a menos que nosotros lo evitemos».[11]

Si algún personaje malvado hay en la narrativa de la historia moderna de los orígenes sin duda ha de ser la entropía, esa tendencia en apariencia inherente de las estructuras a disolverse en lo aleatorio. Sin embargo, la entropía es la leal servidora de la segunda ley de la termodinámica. Por consiguiente, si consideramos a la entropía uno de los personajes de nuestro relato, debemos imaginarla como licenciosa, acechante, indiferente al dolor ajeno e incapaz de mirar de frente. La entropía es también extremadamente peligrosa, pues al final acabará con todos. La entropía adquiere el máximo protagonismo en la apoteosis final de cualquier historia de los orígenes. Será ella quien se encargue de disolver la totalidad de las estructuras existentes, dé carpetazo a todas las formas, a todas las estrellas y las galaxias, y al conjunto de las células vivas. En un libro sobre mitología, Joseph Campbell describió el papel de la entropía en unos términos marcadamente poéticos: «Al mundo que conocemos [...] solo le aguarda un final definido por la muerte, la desintegración, el desmembramiento y la crucifixión de nuestros corazones, pues así de dolorosa habrá de revelarse la transitoriedad de las formas que hemos amado».[12]

La ciencia moderna explica el papel de la entropía con el frío lenguaje de la estadística. La inmensa mayoría de la miríada de disposiciones que pueden adoptar las cosas carece de estructura y presenta un aspecto aleatorio y desordenado. En la mayor parte de

los casos, el cambio es algo así como tomar un mazo de 10^{80} naipes (es decir, un 10 seguido de 80 ceros, lo que equivale aproximadamente al número de átomos que contiene el universo), y barajarlo una y otra vez con la esperanza de acabar encontrando juntos todos los ases. Eso constituye una pauta de rareza inconcebible, tanto que ni siquiera una persona que estuviera barajando las cartas durante un período de tiempo equivalente a varias veces la edad del universo lograría verla realizada. En la mayor parte de los casos el resultado serían estructuras muy débiles o inexistentes. Si hacemos explotar una bomba en el solar de un inmueble en construcción repleto de ladrillos, argamasa, cables y pintura, ¿qué probabilidades hay de que, al disiparse la nube de polvo, nos encontremos de pronto frente a un edificio de apartamentos con la instalación eléctrica perfectamente cableada y los pisos bien decorados y listos para acoger a sus compradores? El mundo de la magia puede hacer caso omiso de la entropía, pero el nuestro no. Por eso la mayor parte del universo, y muy en particular el inmenso espacio vacío que media entre las galaxias, carece de forma y de estructura.

Tanto poder tiene la entropía que no es fácil entender cómo pudo aparecer alguna estructura. Y aun así, sabemos que surgieron y todo parece indicar que su aparición contó con el permiso de la entropía. Es como si, a cambio de permitir que los objetos se unieran para constituir estructuras de mayor complejidad, la entropía hubiera impuesto una suerte de tributo a la complejidad, pagadero en energía. De hecho, tendremos ocasión de ver que, a lo largo del tiempo, la entropía ha gravado la complejidad con una gran variedad de tasas, actuando en ese sentido un poco a la manera del emperador Pedro el Grande, que creó un gabinete gubernamental específicamente dedicado a concebir nuevas contribuciones. A la entropía le encanta este pacto tácito, pues el conjunto de los cánones que satisfacen todas las entidades complejas contribuye a la funesta tarea entrópica de hacer papilla al universo. El solo acto de abonar las cargas fiscales de la entropía incrementa el caos y los

deshechos, tal como sucede con la gestión de las ciudades modernas, cuyo funcionamiento produce un enorme volumen de basura y calor. Todos pagamos los impuestos de la entropía cada segundo de nuestras vidas. Y solo dejaremos de ser contribuyentes netos el día en que desaparezcamos.

¿Cómo surgieron entonces las primeras estructuras? Este es un problema que la ciencia todavía no puede responder de forma cabal, pero abundan ideas prometedoras.

Además de la energía y la materia, el Big Bang engendró unas cuantas reglas operativas básicas. Hubo que esperar a la revolución científica del siglo XVII para que los científicos comenzaran a comprender lo fundamentales que eran esas normas que, en la actualidad, llamamos «leyes fundamentales de la física». Son patrones fijos que explican por qué las frenéticas y caóticas energías del átomo primordial no carecen por completo de orientación: las leyes de la física encauzaron los cambios por una serie de vericuetos muy concretos, y al mismo tiempo cerraron el paso a una gama de posibilidades alternativas prácticamente infinita. Esas mismas leyes actuaron como un filtro e impidieron la materialización de todos aquellos estados del universo incompatibles con sus principios, de modo que en un corte temporal cualquiera, el universo existió en solo uno de los muchos estados compatibles con las normas operativas del cosmos. Y esos nuevos estados, a su vez, generaron nuevas reglas que orientaron el cambio por cauces igualmente inéditos.

Esta constante labor de filtrado de los estados imposibles garantiza la aparición de un mínimo de estructuras. No sabemos por qué surgieron esas leyes fundamentales de la física ni qué pudo determinar que adoptaran las formas que hoy conocemos. Ni siquiera estamos en condiciones de afirmar si esas leyes eran inevitables o no. Quizá existan otros universos provistos de reglas generales ligeramente diferentes. Tal vez haya universos en los que la gravedad sea más intensa o en los que el electromagnetismo no tenga tanta fuerza. En tal caso, los habitantes de esos universos

(caso de haberlos) habrán elaborado una historia de los orígenes totalmente distinta. Es incluso posible que la duración de algunos universos se limitara a una millonésima de segundo, y también pudiera darse el caso de que otros estén llamados a perdurar mucho más tiempo que el nuestro. Tal vez haya universos capaces de generar un gran número de formas de vida exóticas y otros que sean meros cementerios biológicos. Si nuestro universo existe en un multiverso, nada nos impide imaginar que en el momento de su creación se arrojaron unos dados auténticamente soberbios y se hizo la siguiente proclamación: «Vale, habrá gravedad en este universo, y también regirá el electromagnetismo, pero la intensidad de este último deberá ser 10^{36} veces superior a la de la primera». (Ya que esa es efectivamente la relación de fuerzas que media entre la gravedad y el electromagnetismo, al menos en nuestro universo.) La existencia de estas normas garantiza que nuestro universo no será jamás totalmente caótico. Así se asegura que algo interesante acabe por surgir siempre en alguna parte.

En cuanto aparecieron las diversas formas de energía empezaron a formarse estructuras y patrones. Y cuando la energía se condensó y generó las primeras partículas de materia, también estas se regían por normas. Pocos segundos después del Big Bang aparecieron los neutrones, los protones y los electrones, es decir, los elementos constitutivos básicos de los átomos, y lo mismo puede afirmarse de las antipartículas protónicas y electrónicas (o lo que es lo mismo, los antiprotones —protones de carga negativa— y los antielectrones —electrones cargados positivamente—). Así se formó lo que los físicos denominan «materia» y «antimateria». Al desplomarse los grados del universo por debajo del rango de temperaturas en que es posible la creación de materia y antimateria se produjo una especie de violenta competición destructiva a escala universal, y como consecuencia de ella la materia y la antimateria se aniquilaron mutuamente, desprendiendo una inmensa cantidad de energía. Por fortuna para los seres humanos, un minúsculo volumen extra de materia (reducido quizá a una de cada mil millones de partículas)

sobrevivió a la degollina. Las partículas de materia que quedaron permanecieron fijas donde estaban debido a que en muy poco tiempo las temperaturas descendieron tanto que imposibilitaron que volvieran a transformarse en energía pura. Y esos corpúsculos remanentes son los que integran hoy la totalidad de nuestro universo.

Con el descenso de las temperaturas, la materia se diversificó. Los electrones y los neutrinos se vieron dominados por el electromagnetismo y la fuerza nuclear débil. Los protones y los neutrones que forman los núcleos atómicos estaban constituidos a su vez por tríos de extrañas partículas conocidas con el nombre de «cuarks», sólidamente unidos por la fuerza nuclear fuerte. Electrones, neutrones, cuarks, protones, neutrinos..., apenas unos segundos después del Big Bang, el universo, sometido a un rápido proceso de enfriamiento, había logrado fijar ya unas cuantas estructuras concretas, dotadas cada una de sus particulares propiedades emergentes. Sin embargo, al amainar la violencia del huracán desatado por el Big Bang, las energías extremadamente intensas que habían sido necesarias para provocar el surgimiento de esas estructuras primordiales se desvanecieron, y esa es la razón de que las diferentes formas de energía y las diversas partículas (los protones y los electrones, por ejemplo) nos parezcan poco menos que inmortales.

Y así fue como el azar y la necesidad se unieron para dar lugar a las primeras estructuras simples. Las leyes de la física habían actuado a la manera de un tamiz y eliminado un gran número de posibilidades (ese fue el papel de la necesidad). Pero después el azar, valiéndose del potencial creativo que le permitía el número y el tipo de materia remanente, reorganizó las cosas aleatoriamente. Así funcionan todas las cosas. Como ha escrito el especialista en nanofísica Peter Hoffmann: «Atemperado por las leyes físicas, que añaden una pizca de necesidad a la mezcla, el azar se transforma en la fuerza creativa del universo, en el pez gordo que transfigura el

cosmos. Toda la belleza que vemos a nuestro alrededor, de las galaxias a los girasoles, es el resultado de esta colaboración generativa entre el caos y la necesidad».[13]

Los primeros átomos

Pocos minutos después del Big Bang, de la unión de protones y neutrones surgieron más estructuras. El núcleo del átomo de hidrógeno se constituyó con un solo protón. El átomo de helio se formó a partir un par de protones (con dos neutrones). El universo empezaba así a fabricar sus primeros átomos. Ahora bien, la fusión de protones exige una gran cantidad de energía, dado que sus respectivas cargas positivas hacen que se repelan mutuamente. Y como las temperaturas del cosmos habían empezado a descender a toda velocidad justo después del Big Bang, pronto resultó imposible continuar uniendo protones para constituir el núcleo de otros átomos de mayor tamaño. Esto explica uno de los aspectos fundamentales de nuestro universo, a saber, que casi tres cuartas partes del total de átomos que contiene sean de hidrógeno, y que la mayor parte de los restantes sean de helio.

Otra inmensa cantidad de materia era «materia oscura», de la que aún no comprendemos la naturaleza pero sabemos que existe porque su fuerza gravitatoria es lo que determina la estructura y distribución de las galaxias. Por consiguiente, pocos minutos después del Big Bang nuestro universo se hallaba compuesto por una vasta sucesión de nubes de materia oscura y de crepitantes plasmas de protones y electrones incrustados en su masa e iluminados por los chispazos de los fotones que los atravesaban. En la actualidad solo pueden encontrarse esa clase de plasmas en el centro de las estrellas.

Detengámonos un instante y aguardemos pacientemente unos 380.000 años (el doble de tiempo que nuestra especie lleva sobre la superficie de la Tierra). Durante este tiempo, el universo continuó

enfriándose. Cuando las temperaturas descendieron por debajo de los diez mil grados Celsius se produjo una nueva transición de fase, como ocurre, según hemos señalado, cuando el vapor se convierte en líquido. Para explicar esta transición de fase debemos tener en cuenta que el calor es en realidad una expresión del grado de movilidad de los átomos. Todas las partículas de materia se agitan enérgicamente sin cesar, como chiquillos hiperactivos, y la temperatura es *de facto* el valor medio de esa vibración. Las rápidas sacudidas a las que me refiero no son en modo alguno metafóricas, sino perfectamente objetivas. En un famoso artículo publicado en 1905, Einstein mostró que las oscilaciones de los átomos son lo que provoca la rotación aleatoria de las partículas de polvo suspendidas en el aire. Cuando la temperatura baja, las partículas se agitan menos, y llega un momento en el que pueden unirse. Cuando el universo se enfrió, la fuerza electromagnética atrajo a los electrones de carga negativa hacia los protones de signo eléctrico positivo hasta que el convulsivo movimiento de los primeros se calmó lo suficiente como para empezar a orbitar en torno a los segundos. ¡Y ya está! ¡Al fin tenemos formados los átomos primigenios, es decir, los ladrillos básicos que constituyen la totalidad de la materia que nos rodea!

En condiciones normales, los átomos aislados son eléctricamente neutros, pues las cargas positivas y negativas de sus protones y sus electrones se compensan unas a otras. Por consiguiente, al formarse los primeros átomos de hidrógeno y helio la mayor parte de la materia del universo se convirtió de pronto en neutra, así que el chispeante plasma se evaporó. A partir de ese momento, los fotones, que son los vectores en los que viaja la fuerza electromagnética, quedaron en condiciones de fluir libremente y de recorrer la neblina de átomos y materia oscura que integraba el cosmos, dado que la totalidad de esa bruma había pasado a ser neutra desde el punto de vista eléctrico. En la actualidad, los astrónomos pueden detectar las consecuencias de esa transición de fase porque, debido a su energía, los fotones que escaparon del

plasma generaron, una especie de suave murmullo en segundo plano (la radiación de fondo de microondas) que todavía puede oírse en todo el universo.

Nuestra historia de los orígenes traspasa así su primer umbral. Tenemos un universo. Cuenta ya con algunas estructuras dotadas de un conjunto de propiedades emergentes y características. Este cosmos posee además diferentes formas de energía y de materia, cada una de ellas provista de una personalidad propia. Contiene también un gran número de átomos. Y dispone de unas normas operativas inherentemente suyas.

¿Con qué pruebas contamos?

Por extraño que pueda parecer este relato cuando lo escuchamos por primera vez, conviene tomárselo en serio porque lo sustenta un inmenso volumen de pruebas.

La primera pista que indicó a los científicos que el Big Bang se había producido realmente surgió al descubrirse que el universo se está expandiendo. Y si hoy continúa dilatándose, la lógica señala que en algún momento de un pasado muy, muy remoto debió de ser de una pequeñez infinitesimal. Sabemos que el universo está en expansión porque disponemos de una serie de instrumentos y de técnicas de observación desconocidas para las gentes del lago Mungo, aunque no cabe duda de que eran capaces de reconocer a simple vista muchas de las constelaciones y grupos estelares del firmamento, lo que de hecho nos invita a considerarlos como consumados astrónomos.

Desde los tiempos de Isaac Newton, la mayoría de astrónomos han supuesto que el universo ha de ser infinito, pues de lo contrario las leyes de la gravedad habrían aglomerado la totalidad de cuanto contiene en una única masa viscosa, como un grumo de grasa en un sumidero. A mediados del siglo XIX, los astrónomos contaban ya con instrumentos lo suficientemente precisos como para empezar a

cartografiar la distribución de las estrellas y las galaxias, y los mapas celestes que trazaron mostraban una imagen del universo muy distinta a la que se había tenido hasta entonces.

Estos mapas celestes empezaron siendo grupos de nebulosas borrosas y manchas desdibujadas que aparecían en todos los mapas de estrellas. (Hoy sabemos que la mayor parte de las nebulosas están formadas por galaxias enteras, y que estas a su vez contienen miles de millones de estrellas.) ¿A qué distancia se encontraban esas nebulosas? ¿Qué eran exactamente? ¿Se desplazaban? Con el paso del tiempo, los astrónomos aprendieron a extraer cada vez más información acerca de las estrellas a partir del análisis de la luz que emiten. Y así averiguaron, por ejemplo, la distancia a la que se encuentran respecto a nuestra propia posición y si se están aproximando o alejando de nosotros.

Uno de los métodos más ingeniosos para comprender el movimiento de las estrellas y las nebulosas es el que se basa en el llamado efecto Doppler (que debe su nombre al matemático decimonónico austríaco Christian Andreas Doppler) para medir la velocidad a la que se mueven las estrellas y las nebulosas en el viaje que las acerca o aleja de la Tierra. La energía se desplaza en forma de ondas, y estas, similares a las que vemos en la playa, tienen una frecuencia. Describen picos y valles a un ritmo regular que es posible medir. Ahora bien, la frecuencia se modifica si el observador se desplaza. Si uno se zambulle en el mar y empieza a nadar en dirección opuesta a la orilla, tendrá la impresión de que la frecuencia con que intercepta las olas aumenta. Y lo mismo sucede con las ondas sonoras. Si un objeto ruidoso, por ejemplo una moto, se aproxima a nosotros, la frecuencia de las crestas de ese sonido nos dará la sensación de un *crescendo*, y la interpretación que harán nuestros oídos del incremento de la frecuencia se traducirá en la percepción de un tono más alto. Sin embargo, cuando el motociclista supere nuestra posición, la sonoridad parecerá adquirir unos matices más graves, porque ahora las ondas sonoras se alargan. Como es obvio, el motorista, que no se mueve de su vehículo, oye siempre el

mismo tono. El efecto Doppler es justamente ese cambio aparente que se aprecia en la frecuencia de las emisiones electromagnéticas cuando los objetos se acercan o se alejan unos de otros.

La luz de las estrellas obedece al mismo principio. Si una estrella o una galaxia se está aproximando a la Tierra, la frecuencia de sus ondas luminosas parece ir aumento. Al interpretar los estímulos lumínicos, nuestros ojos tienden a ver de color azul las frecuencias más altas del espectro de la luz visible, de modo que decimos que una estrella o una galaxia que se acerca a nuestro planeta experimenta un corrimiento hacia el extremo azul del espectro electromagnético. Por el contrario, si el objeto cósmico se aleja de la Tierra, la frecuencia de la luz que desprende parecerá desplazarse al polo rojo de ese mismo espectro, cosa que los astrónomos describen como un «corrimiento al rojo». También podemos averiguar la velocidad a la que se desplaza una galaxia mediante la medición de las variaciones que experimenta la frecuencia de la luz que emite.

En 1814, un joven científico alemán llamado Joseph von Fraunhofer inventó el primer espectroscopio útil para la ciencia. El espectroscopio es un prisma especial que separa las diferentes frecuencias de la luz estelar tal como hacen los paralelepípedos de vidrio, que dividen el rayo de luz blanca en los colores del arco iris. Fraunhofer descubrió que, a determinadas frecuencias, el espectro de la luz solar presentaba una serie de finas líneas oscuras: algo así como un código de barras cosmológico. Otros dos investigadores alemanes, Gustav Kirchhoff y Robert Bunsen, lograron demostrar en el laboratorio que a determinadas frecuencias los elementos químicos emiten o absorben energía luminosa. Daba la impresión de que aquellas rayas de tonalidad más apagada se debían al hecho de que la luz procedente del núcleo solar era absorbida por los átomos de los distintos elementos situados en las capas más externas del sol, cuya temperatura es inferior a la del centro. Esto reducía la energía disponible a esas frecuencias y dejaba una impronta de líneas oscuras en el espectro de emisión. Damos a esas estrías el nombre de «líneas de absorción», y los diferentes elementos

presentan cada uno su particular pauta de líneas de absorción. Pongamos un ejemplo: hay líneas que son características del carbón y el hierro. Si la luz de la estrella en cuestión se desplaza al rojo, todas las líneas de su espectro luminoso tienden hacia ese mismo extremo rojo y podemos medir con exactitud el grado de corrimiento que muestran. Es como si el astrónomo dispusiera de una especie de dispositivo de control de velocidad similar al que usa la policía de tráfico.

A principios del siglo XX, el astrónomo estadounidense Vesto Slipher empleó estas técnicas para poner de manifiesto que el número de objetos astronómicos que viran al rojo es asombrosamente elevado —lo que significa que se están alejando de la Tierra, y a buena velocidad, además—. Esa tendencia a la dispersión resultaba muy extraña. Su verdadero sentido se comprendió cuando otro astrónomo estadounidense, Edwin Hubble, puso en relación estos hallazgos con las mediciones de la distancia que nos separa de esos lejanísimos cuerpos celestes.

Calcular la distancia que media entre nuestro planeta y las estrellas y las nebulosas resulta sumamente complejo y problemático. Como ya advirtieron los antiguos griegos, una posibilidad es utilizar el método del paralaje, similar al sistema de los agrimensores. Si uno dedica unos meses a contemplar atentamente la posición de las estrellas, mientras la Tierra orbita en torno al Sol, advertirá que algunas de esas luces parecen cambiar de posición respecto de las constelaciones vecinas. En tal caso, recurriendo a la trigonometría puede calcularse la distancia a la que se encuentran. Por desgracia, incluso la estrella más cercana, conocida como Próxima Centauri, se halla tan lejos (unos cuatro años luz de la Tierra) que no es posible detectar ningún desplazamiento sin un equipo muy sofisticado. Hubo que esperar al siglo XIX para que los astrónomos estuvieran en condiciones de medir la distancia a las estrellas más próximas valiéndose del paralaje. En cualquier caso, los objetos que estudiaba Vesto Slipher estaban a distancias muchísimo más remotas.

Afortunadamente, a principios del siglo xx una astrónoma del Observatorio del Harvard College, Henrietta Leavitt, concibió una forma de medir la distancia que nos separa de las estrellas y las nebulosas alejadas de la Tierra utilizando un tipo de estrella muy particular que se conoce con el nombre de «variable cefeida» —una estrella cuyo brillo varía con gran regularidad (de hecho, la estrella polar es una Cefeida)—. Leavitt descubrió que existía una correlación muy sencilla entre la frecuencia de las variaciones y la luminosidad o brillo de la estrella, de modo que pudo calcular el resplandor absoluto de una de las Cefeidas. Hecho esto, y mediante la comparación del brillo aparente que mostraba la estrella al ser contemplada desde la Tierra, Leavitt pudo hacer una estimación de la distancia a la que se encontraba, dado que la cantidad de luz que nos llega de una estrella disminuye en función del cuadrado de la distancia que haya tenido que recorrer. Esta maravillosa técnica proporcionó a la ciencia las candelas astronómicas estándar que necesitaba Edwin Hubble para realizar dos profundos descubrimientos sobre nuestro universo.

A principios del siglo xx, la mayoría de los astrónomos creían que la totalidad del cosmos se hallaba contenido en el interior de nuestra galaxia, la Vía Láctea. En 1923, Hubble empleó uno de los telescopios más potentes del mundo, el situado en el Observatorio del Monte Wilson de Los Ángeles, para mostrar que las Cefeidas variables situadas en lo que por entonces se conocía con el nombre de «nebulosa de Andrómeda» se encontraban tan alejadas de la Tierra que era imposible que se hallaran dentro de los límites de nuestra galaxia. Esto probaba lo que algunos astrónomos ya sospechaban: que el universo era mucho mayor que la Vía Láctea y estaba poblado de muchas galaxias y no solo de la nuestra.

Sin embargo, cuando empezó a medir las distancias que nos separan de un buen número de objetos lejanos con el método de las cefeidas variables, Hubble hizo un descubrimiento aún más asombroso. En 1929 demostró que casi todas las galaxias parecían estar alejándose de nuestro planeta y que los objetos estelares más

remotos eran justamente los que daban la impresión de experimentar un mayor y más intenso corrimiento al rojo. En otras palabras, cuanto más distante se hallaba un objeto, más deprisa se alejaba de nosotros, y eso parecía indicar que todo el universo se hallaba en expansión. El astrónomo belga Georges Lemaître, quien ya había llegado a esa conclusión de un modo teórico, señaló que si el universo se estaba expandiendo, debía concluirse que en algún momento del pasado la totalidad de cuanto contiene debió de estar comprimida en un espacio minúsculo, en una especie de punto infinitesimal al que él llamó «átomo primordial».

A la mayoría de los astrónomos les sorprendió la idea de que el universo pudiera estar expandiéndose y supusieron que Hubble había cometido algún error en sus cálculos. Ni siquiera el propio Hubble estaba convencido, y de hecho Einstein estaba tan seguro de que el universo era estable que retocó las ecuaciones de su teoría de la relatividad general para que predijeran un cosmos fijo e invariable añadiendo lo que denominó la llamada «constante cosmológica».

El escepticismo de los astrónomos se debía en parte a que las estimaciones de Hubble resultaban efectivamente problemáticas. De acuerdo con sus cálculos, la expansión del universo había empezado apenas dos mil millones de años antes de su descubrimiento, y sin embargo los astrónomos sabían ya que la antigüedad de la Tierra y su sistema solar se remontaba a un período muy anterior. Esta es una de las razones de que, durante varias décadas, la mayoría de los astrónomos consideraran que la idea de un universo en expansión resultaba intrigante pero probablemente errónea. Predominaban quienes preferían la teoría cosmológica del estado estacionario, propuesta en 1948 por Hermann Bondi, Thomas Gold y Fred Hoyle. Según los defensores del universo estático, no había duda de que las galaxias parecían estar distanciándose unas de otras, pero como al mismo tiempo se estaban creando nuevas cantidades de materia, lo que sucedía a la gran escala del cosmos era que el universo conservaba aproximadamente la misma densidad, con lo que en realidad cambiaba muy poco.

Aun así, las pruebas terminaron por inclinar la balanza en favor del universo expansivo. En la década de 1940, Walter Baade, un astrónomo que trabajaba en el Observatorio del Monte Wilson de Los Ángeles (el mismo en el que Hubble había efectuado sus mediciones), mostró que existían dos tipos de estrellas que cumplían las condiciones de las variables cefeidas, y que en función de cuál se empleara en los cálculos se obtenían diferentes estimaciones de las distancias interestelares. Los cómputos revisados de Baade sugerían que el Big Bang podría haberse producido hace más de diez mil millones de años (las estimaciones más recientes indican que tuvo lugar hace nada menos que 13.820 millones de años). Esto eliminaba el anterior problema cronológico. Actualmente no tenemos noticia de que existan objetos astronómicos de antigüedad superior a esos 13.820 millones de años, lo cual es un argumento muy sólido en favor de la cosmología del Big Bang. A fin de cuentas, si el universo no experimentara ningún cambio y fuera eterno, está claro que deberíamos encontrar un gran número de objetos de más de 13.820 millones de años.

La prueba definitiva apareció a mediados de la década de 1960 y se obtuvo gracias al descubrimiento de la radiación de fondo de microondas, que es la radiación que generó la formación de los primeros átomos, ocurrida aproximadamente 380.000 años después del Big Bang. La radiación de fondo de microondas constituyó también la constatación definitiva de la expansión del universo. ¿Por qué?

En los años cuarenta del siglo pasado, varios astrónomos y físicos consideraron que los datos de Hubble eran lo bastante llamativos para que valiera la pena intentar imaginar qué habría podido suceder en caso de que efectivamente se hubiera producido una gran explosión. ¿Qué aspecto habría tenido el universo inicial si todo se hallaba comprimido en un átomo primordial? Si Hubble y Lemaître estaban en lo cierto, el universo primitivo debió de ser enormemente denso y tener una temperatura elevadísima, y también tuvo que estar sometido a un rápido proceso de expansión y enfriamiento.

¿Cómo se habrían comportado la materia y la energía en condiciones tan extremas? En el transcurso de la segunda guerra mundial, el Proyecto Manhattan, concebido para fabricar una bomba atómica, había incentivado la investigación de la física de altas temperaturas. A finales de la década de 1940, el físico de origen ruso George Gamow se basó en los hallazgos derivados del Proyecto Manhattan para inferir lo que pudo haber sucedido en el universo inmediatamente después del Big Bang. En colaboración con su colega Ralph Alpher, Gamow predijo que el universo habría terminado por enfriarse lo suficiente como para propiciar la formación de átomos, a lo que añadió que, una vez constituidos estos, debió de liberarse una cantidad de energía colosal al escapar los fotones del plasma eléctricamente cargado de la era preatómica y empezar a fluir libremente por el universo, convertido ya en un entorno neutro desde el punto de vista eléctrico. Es más, ambos científicos argumentaron que este destello de energía todavía debería poder detectarse, aunque posiblemente su frecuencia hubiera descendido ya hasta valores casi nulos, dado que se había estado dispersando por un universo en pleno proceso de dilatación. Si los científicos observaban las cosas con la minucia suficiente encontrarían esa radiación a temperaturas cercanas al cero absoluto, y además esa radiación vendría de todas direcciones. Muchos pensaron que se trataba de una idea descabellada, y por eso nadie se puso a buscar una radiación de baja temperatura presente en el conjunto del cosmos.

En 1964 se detectó accidentalmente el destello de radiación de Gamow. En los laboratorios Bell de Holmdel, en Nueva Jersey, dos radioastrónomos llamados Arno Penzias y Robert Wilson empezaron a construir una antena de radio con el objetivo de establecer contacto con los satélites artificiales. Para purgar las interferencias decidieron enfriar el receptor hasta dejarlo en una temperatura situada apenas 3,5 grados Celsius por encima del cero absoluto, pero comprobaron que a pesar de todo persistía un desconcertante zumbido de energía de baja temperatura. Parecía proceder de todas

direcciones, así que sabían que la causa no podía ser una explosión estelar de ciclópea magnitud. Sospechando que el receptor acusaba algún problema técnico, ahuyentaron a un par de palomas que habían adquirido la costumbre de encaramarse a los brazos de la antena y limpiaron todas las deyecciones que habían dejado las aves, pero no se produjo ningún cambio. (La parte triste de la historia es que las palomas regresaban una y otra vez a la torre receptora, así que al final hubo que sacrificarlas.) No lejos de allí, en Princeton, un equipo de astrónomos dirigido por Robert Dicke acababa de iniciar la búsqueda de la radiación de fondo de Gamow y un buen día oyó hablar del tropiezo de Penzias y Wilson. Comprendieron de inmediato que les habían adelantado. Los dos equipos de investigación decidieron publicar conjuntamente su descubrimiento en una serie de artículos científicos en los que identificaban su hallazgo con la energía que, según había colegido Gamow, se liberó inmediatamente después del Big Bang.

El descubrimiento de la radiación de fondo de microondas convenció a la mayoría de los astrónomos de que el Big Bang había sido un acontecimiento real, pues ninguna otra teoría era capaz de explicar esa radiación omnipresente. Confirmar una predicción estrafalaria pero coronada en último término por el éxito, como sucedió en este caso, es uno de los modos más categóricos de convencer a la comunidad científica de la validez de una teoría. Al parecer, pues, el universo estaba expandiéndose y había surgido como consecuencia de una gran explosión, el Big Bang.

En la actualidad, las pruebas de que el cosmos que habitamos inició su andadura con una deflagración colosal son abrumadoras. Quedan por resolver un gran número de detalles, pero por el momento, la idea central de que esa detonación supuso el primer capítulo de la historia moderna de los orígenes está firmemente asentada. Así fue el inicio del universo. Y dado que la física cuántica permite que las cosas puedan surgir del vacío, todo parece indicar que la totalidad del universo surgió de una suerte de nada rebosante de capacidades potenciales.[14]

Capítulo 2

ESTRELLAS Y GALAXIAS: UMBRALES 2 Y 3

«La humanidad está hecha de polvo estelar.»

Harlow Shapley, *View from a Distant Star*

El Big Bang nos dio un universo, pero durante varios cientos de miles de años el cosmos tuvo un aspecto muy simple. Sin embargo, bajo la superficie se estaban gestando un gran número de interesantes posibilidades nuevas, así que al final la oscuridad comenzó a retroceder, empujada por la luminosidad de las estrellas y las galaxias. La aparición de estos nuevos actores añadió al relato un plantel de personajes enteramente nuevo, además de un buen puñado de propiedades emergentes y una larga serie de formas de complejidad desconocidas hasta entonces. La cuestión es que este semillero de intérpretes bisoños iba a lograr que el universo cruzara el segundo umbral de creciente complejidad en que se hallaba embarcado. No obstante, para explicar cómo surgieron estos majestuosos e insólitos objetos debemos retroceder al principio de los tiempos.

La energía libre: el impulsor de la complejidad

En los segundos y minutos inmediatamente posteriores al Big Bang, el universo entró en caída libre termodinámica. Durante unos breves y resplandecientes instantes, el cosmos había dispuesto de la energía suficiente para hacer y deshacer un vasto conjunto de

formas de energía y materia tan primordiales como exóticas, pero la posterior caída de las temperaturas hizo que la energía y la materia cuajaran en una gavilla de estructuras simples. En el crisol del Big Bang, las fuerzas y las partículas se estabilizaron como la cerámica en el horno. La suma de las violentas energías del Big Bang y de los efectos de unas cuantas leyes sencillas había creado unas estructuras que no tardarían en revelarse notablemente estables —como los protones y los electrones, por ejemplo—, dado que las temperaturas que habían contribuido a su aparición rara vez habrían de volver a darse en un universo sometido ya a un proceso de enfriamiento.

Después, el rápido descenso de las temperaturas se ralentizó, como si el cosmos bajara la pendiente de una cordillera termodinámica y se dirigiera a un valle. Los diferentes gradientes de temperatura se igualaron, el calor comenzó a disminuir de un modo menos drástico, y el ritmo de cambio decreció debido a que el abrupto farallón termodinámico del universo primitivo estaba dando paso a un paisaje más llano y ondulado en el que los grados Celsius tanto podían subir como bajar. Empezó entonces a ser más difícil que se fijaran nuevas estructuras novedosas, porque cualquier incremento de temperatura, por modesto que fuese, podía determinar su desaparición. En el interior de las estrellas de la primera generación de soles, por ejemplo, una subida de apenas diez mil grados Celsius bastaba para que los átomos se desintegraran.

En estos entornos menos predecibles, la estabilización de las estructuras complejas requiere elementos de sujeción extra. Y los encargados de proporcionar esos anclajes adicionales fueron los flujos controlados y no aleatorios de energía. El cemento que mantiene la cohesión de las estrellas proviene de los flujos de energía que se generan en sus respectivos núcleos. Los organismos vivos, como usted y como yo mismo, se mantienen unidos gracias a un delicado conjunto de flujos de energía orientados con gran precisión a su objetivo y gestionados por los complejos procesos

metabólicos de nuestras células. En el universo posterior al Big Bang, había que realizar un gran número de tareas para construir y preservar las nuevas estructuras complejas que iban surgiendo. Esta es la razón de que exista un vínculo muy profundo entre la forma, la complejidad y los flujos de energía canalizados o estructurados de un modo concreto.

La expresión «flujos de energía estructurados» es más una descripción intuitiva que un término de la jerga científica, pero expresa bien la idea: la teoría termodinámica distingue entre aquellos flujos de energía de carácter completamente aleatorio y aquellos otros con una orientación, una estructura y una coherencia que les permiten efectuar trabajo (en el sentido físico de la palabra). Se denominan «energía libre» los flujos de energía estructurados, y «energía calorífica», o simplemente «calor», los carentes de estructura. No se trata de una diferencia absoluta. En realidad, hablamos de grados de coherencia o de aleatoriedad; pero la distinción entre energía libre y energía calorífica es fundamental para nuestra historia de los orígenes.

La primera ley de la termodinámica nos dice que la cantidad total de energía del universo es constante. Se conserva. Todo sucede como si el potencial de cosas que pueden suceder en nuestro universo estuviera fijado desde el principio. Por consiguiente, lo que nos indica la primera ley de la termodinámica son las características del océano primordial de posibilidades. La segunda ley de la termodinámica nos explica que las cosas surgidas de aquel primitivo magma de posibilidades podían estar más o menos estructuradas, como las ondas que rizan la superficie de una corriente de agua. Sin embargo, esa misma ley añade a continuación que lo que cabe esperar es que la mayoría de esas cosas pertenezcan a la categoría de las menos estructuradas, y que con el paso del tiempo su estructura vaya disminuyendo aún más. Esto se debe a que la mayoría de las disposiciones que pueden adoptar la materia y la

energía son disposiciones con una estructura muy escasa o inexistente, y si por casualidad encontramos alguna estructura debemos asumir que no tardará en decaer y desmoronarse.

Una cascada es una buena imagen para ejemplificarlo. Estamos ante un abundante número de estructuras, pero al final todas se disipan. Las moléculas de agua que fluyen en lo alto de la catarata no se mueven de forma aleatoria, como las moléculas de aire en una jarra. Se desplazan todas en una misma dirección como los felinos al acecho, tan juntos como pueden. Esto se debe a que, a diferencia de las moléculas de gas, que se desplazan como individuos, la cohesión de las moléculas de los líquidos depende del electromagnetismo, lo que significa que la gravedad puede moverlas en formación cerrada y en la misma dirección, como los soldados en una marcha. Como el agua por el borde del despeñadero, la energía potencial se convierte en energía cinética, es decir, en energía derivada del movimiento. Y se trata además de un desplazamiento coordinado y orientado en una única dirección. Es una translación estructurada, así que podemos afirmar que la energía que la impulsa es una energía libre. Y si la energía libre, a diferencia de la energía calorífica de las moléculas de gas, es capaz de realizar un trabajo se debe a que posee una cierta estructura y una forma determinada, lo que a su vez le permite propulsar las cosas en una misma dirección en lugar de dispersarlas hacia todas partes.[1] Si quisiéramos, podríamos encauzar ese flujo de energía libre y hacerlo pasar a través de una turbina para generar electricidad. La energía libre es lo que permite hacer cosas. Es el infatigable y veloz conejito Energizer* de nuestra historia de los orígenes.

Sin embargo, a diferencia de la energía en general, la energía libre no se conserva; es inestable, como un muelle que se distiende. Al efectuar trabajo, esa energía libre pierde a un tiempo su estructura y la facultad de continuar realizando trabajo. Cuando impacta contra las rocas del fondo, el agua de la catarata adquiere la dispersa e incoherente energía del calor. Cada molécula se mueve más o menos independientemente. La energía sigue ahí, continúa

conservándose (recordemos que esa era la primera ley de la termodinámica), pero las moléculas empujan en tan diversas direcciones que su energía sería incapaz de mover una turbina. La energía libre se ha transformado en energía calorífica. La segunda ley de la termodinámica nos dice que, a muy largo plazo, toda la energía libre se convertirá en energía calorífica.

Como un policía de tráfico borracho, la energía calorífica dirige la energía a todas partes, sin orden ni concierto, y provoca el caos; en cambio, la energía libre es un agente sobrio y consciente que encauza la energía por rutas definidas y pone orden. Afortunadamente para nosotros, el universo primitivo tenía una cierta cantidad de energía libre gracias a las leyes fundamentales que rigen el funcionamiento del cosmos. Esas pautas encarrilaron la energía por sendas concretas de carácter no aleatorio y garantizaron así el surgimiento de un mínimo de estructuras.

GALAXIAS Y ESTRELLAS: EL UMBRAL 2

La energía libre fue el motor que propició la aparición de las primeras estructuras de gran tamaño: las galaxias y las estrellas. La fuente más importante de energía libre para la materialización de esta parte de nuestra historia de los orígenes fue la gravedad. Esta se comporta como un perro pastor cosmológico al que le gusta reunir y agrupar las cosas. Y los objetos que pastoreó fueron precisamente las sencillas formas de materia creadas con el Big Bang. Unidas, la gravedad y la materia alumbraron las condiciones Ricitos de Oro necesarias para que nacieran las estrellas y las galaxias.

Los estudios relacionados con la radiación de fondo de microondas muestran que, a gran escala, el universo primitivo contaba con muy pocas estructuras. Imagínese una sutilísima bruma de átomos de hidrógeno y helio flotando en un caliente caldo de materia oscura atravesado por fotones de luz. Piense además que

toda esa neblina se encontraba aproximadamente a la misma temperatura. Sabemos que la composición del universo primitivo era homogénea porque podemos medir las diferencias de temperatura presentes en la radiación de fondo de microondas, y eso nos ha permitido descubrir que las partes más calientes del universo primitivo apenas superaban en una centésima de grado la temperatura de las secciones más frías. En ese entorno, pues, no había ningún gradiente de calor susceptible de ser utilizado, ninguna cascada de energía capaz de contribuir a la creación de nuevas estructuras. Usted podría generar ahora mismo una diferencia de temperatura muy superior mediante la simple acción de frotarse el dedo en la cara.

Después, la gravedad empezó a dar forma a todo ese material en apariencia tan poco prometedor y obtuvo algo más interesante. Aunque el Big Bang siguiera dispersando el espacio, la gravedad se afanaba por reagrupar la energía y la materia.

La idea de la gravedad no solo tuvo un rol capital en la comprensión que Newton alcanzó del universo, sino que constituyó uno de los conceptos unificadores de la revolución científica. Newton explicó la forma en que opera la gravedad en una de las obras científicas más relevantes de todos los tiempos, la *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, o *Principios matemáticos de la filosofía natural*, publicada en 1687. Newton consideraba que la gravedad era una fuerza de atracción universal que actuaba sobre cualquier masa de materia. Dos siglos y medio más tarde, Einstein mostró que la energía también podía ejercer fuerzas de atracción gravitatoria porque la materia está compuesta de energía.

Einstein hizo otra importante predicción sobre la gravedad: se trataba de una forma de energía, de modo que, al igual que el electromagnetismo o el sonido, necesariamente debía generar ondas. Aun así, Einstein temía que jamás pudieran detectarse porque esas ondas podían ser verdaderamente diminutas. En septiembre de 2015, en un magnífico ejemplo de la mejor práctica científica, dos enormes máquinas (una en Luisiana y la otra en el

estado de Washington) finalmente pudieron advertir las ondas gravitatorias. El observatorio de interferometría láser de ondas gravitatorias (o LIGO, según sus siglas inglesas: Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) fue la institución encargada de manejar ambos aparatos. En 2017 se concedió el premio Nobel de Física a tres de los investigadores que más habían contribuido al proyecto. Las ondas gravitatorias descubiertas por el LIGO se generaron hace unos cien millones de años cuando, en algún punto de una lejana galaxia situada en el firmamento del hemisferio sur, colisionaron entre sí dos agujeros negros. (Cuando eso sucedió, los dinosaurios todavía dominaban la Tierra.) En la superficie de nuestro planeta, cada una de las máquinas del proyecto LIGO divide en dos un conjunto de haces luminosos y los emite una y otra vez por dos tubos dispuestos en ángulo recto, ambos de cuatro kilómetros de longitud y provistos de espejos en sus extremos. Después de casi trescientos viajes de ida y vuelta, se comprueba que los rayos de luz no regresan exactamente al mismo tiempo al receptor. Lo que ha ocurrido es que una serie de minúsculas ondas gravitacionales ha extendido los tubos en una dirección y provocado su encogimiento en otra, aunque las dimensiones de ese doble proceso de dilatación-retracción sean muy inferiores a la anchura de un protón. Y ahora que los astrónomos tienen constancia de la existencia de las ondas gravitacionales, su esperanza es poder servirse de ellas para estudiar el universo. Desde el punto de vista de la gravedad, el universo primitivo era demasiado uniforme. Era necesario que presentara una textura más grumosa. Esta tendencia de la gravedad a reorganizar el cosmos explica por qué pensamos en un universo primitivo de baja entropía, una suerte de ordenación que esa misma entropía desbaratará en el transcurso de unos cuantos miles de millones de años. Y una vez que se puso en marcha, a la gravedad le bastaron unos pocos centenares de millones de años para transformar la homogénea neblina de partículas del universo primitivo en un entorno mucho más anárquico y apelotonado, repleto de estrellas y galaxias.

Como Newton puso de manifiesto, la fuerza de la gravedad crece de forma directamente proporcional a la masa de los objetos y a su proximidad. Por eso la Tierra ejerce sobre las cosas una atracción gravitatoria muy superior a la que podamos mostrar los seres humanos, y eso explica también por qué tira de nosotros con una intensidad mucho más suave cuando nos encontramos lejos de su superficie (a la distancia, pongo por caso, de la Estación Espacial internacional). Fijemos ahora la atención en un pequeño cubo de la neblina de partículas del universo primitivo. Imaginemos que la materia oscura y los átomos, de forma totalmente aleatoria, han acabado un poco más concentrados en un extremo del cubo que en otro. Las leyes de Newton nos dicen que la gravedad actuará con más fuerza en el ángulo de mayor densidad, de modo que en esa zona la materia tenderá a aglutinarse de manera mucho más intensa, con lo que la diferencia entre las regiones densas y las vacías tenderá a aumentar. Así pues, cubo a cubo y en varios millones de años, la gravedad logró que el universo se volviera granuloso y amazacotado.

Cuando la gravedad forzó la aglomeración de los átomos, estos comenzaron a colisionar entre sí con mayor frecuencia, incrementándose asimismo su frenética agitación. Esto elevó las temperaturas en las regiones más apelotonadas, con lo que el calor se concentró en pequeños volúmenes de espacio. (Este mismo principio explica por qué un neumático se calienta al inflarlo.) Aunque el universo en general estaba enfriándose, las zonas repletas de terrones de materia empezaron a calentarse de nuevo. Al final, algunos de esos grumos alcanzaron unas temperaturas tan elevadas que los protones no pudieron seguir reteniendo a sus electrones. Los átomos se disgregaron, recreando en el interior de todos esos terrones el crepitante plasma saturado de cargas eléctricas que antiguamente había ocupado la totalidad del cosmos.

Al crecer la presión, por efecto de la gravedad, aumentó todavía más la densidad de las regiones previamente condensadas, la temperatura del núcleo de esas zonas se disparó y las fuerzas de

atracción comenzaron a recrear las altas energías del universo primitivo. Cuando alcanzan unos diez millones de grados Celsius, los protones tienen tanta energía y entrechocan con tal violencia que logran vencer las fuerzas de repulsión de sus cargas positivas. Una vez superada esa barrera, los protones empezaron a formar parejas, unidos por la fuerza nuclear fuerte, que solo opera a distancias minúsculas. Los pares de protones constituyeron así núcleos de helio, tal como había sucedido, brevemente, en otra época, justo después del Big Bang.

Al fusionarse los protones, una parte de su masa se transformó en energía pura, y como hemos visto, hasta la más diminuta partícula de materia contiene una cantidad de energía colosal. Estas mismas energías enormes son las que libera una bomba de hidrógeno al explotar, cuya potencia deriva, como en cualquier estrella, de la fusión nuclear. Por consiguiente, cuando el núcleo de una densa nube de materia supera el umbral crítico de los diez millones de grados, aproximadamente, empieza a producirse la fusión de trillones de protones, que de ese modo se convierten en núcleos de helio y generan una caldera que desprende una titánica cantidad de energía. Una vez iniciada la combustión, el horno seguirá encendido mientras haya suficientes protones libres para proseguir con la fusión.

Las enormes cantidades de energía que libera dicha fusión calientan el núcleo del objeto, que se expande y consigue contrarrestar la fuerza de la gravedad. Llegada la reacción a este punto, el conjunto de la estructura recién creada quedará en situación estable durante millones o miles de millones de años. Ha nacido una estrella.

UN UNIVERSO POBLADO DE ESTRELLAS Y GALAXIAS

Pero no surgió solo una estrella. En todas y cada una de las regiones grumosas que hemos mencionado se iluminaron miles de millones de hogueras, comenzaron a brillar las inmensas ciudades estelares que llamamos «galaxias» y la oscuridad del joven universo dio paso a la luz.

Este cosmos sembrado de galaxias y estrellas es muy diferente al de los primeros átomos. Ahora el universo posee estructuras, tanto a pequeña como a gran escala, y por eso podemos afirmar que el universo es ahora más complejo. Existen zonas oscuras y vacías entre las galaxias, y regiones resplandecientes y densas en el interior de las mismas. Las galaxias están repletas de materia y energía, mientras que el espacio que las separa aparece frío y desierto. Una vez perdida su antigua textura dispersa, similar a la de una bruma, los elementos dignos de interés se hallan ahora concentrados en las inmensas láminas y filamentos de las galaxias, semejantes en cierto modo a los hilos de una gigantesca tela de araña. Cada galaxia cuenta con su particular estructura. Son en su mayor parte galaxias espirales, como la que nosotros mismos habitamos (la Vía Láctea), y contienen varios cientos de miles de millones de estrellas, todas ellas abocadas a girar lentamente en torno a un núcleo central denso en el que, por regla general, hay un agujero negro. No obstante, hay galaxias que chocan con otras, y en ese caso su estructura aparece desordenada y da lugar a lo que llamamos «galaxias irregulares». Y a su vez, la acción de la gravedad acaba agrupando las galaxias, formando cúmulos y racimos cumulares (o supercúmulos), lo que da pie al surgimiento de archipiélagos estelares, diseminados por todo el universo.

Las estrellas aisladas tachonan el cosmos, como pasas calientes en un pudin frío, y también ellas contienen un gran número de estructuras, además de una larga serie de propiedades emergentes. En el centro de todas las estrellas hay un núcleo caliente en el que los protones se fusionan, lo que genera una energía que supera la fuerza de la gravedad. Ese núcleo se halla envuelto de un conjunto de capas externas que, además de someterlo a una enorme presión,

le suministran los protones que le sirven de combustible. La biografía de una estrella depende sobre todo de su masa inicial, es decir, de la cantidad de materia que contenía al nacer. Las estrellas de mayor masa generan una mayor presión gravitatoria, de modo que su temperatura es muy superior a la de otras estrellas menos voluminosas. Esto explica por qué queman tan deprisa su carburante y terminan por apagarse en apenas unos cuantos millones de años. Las estrellas de menos masa arden mucho más lentamente, lo que significa que el período de incandescencia de muchas de ellas rebasará con mucho la actual edad del universo.

Este universo del segundo umbral no solo es mucho más diverso sino que cuenta con un conjunto de entornos más variado, con un mayor potencial creativo y con un montón de gradientes de energía. Hay en él diferencias de luminosidad, de temperatura y de densidad, y entre esos distintos escalones energéticos fluye la energía libre, como el agua por una quebrada. Todas las estrellas vierten energía a los gélidos espacios que las rodean, produciendo con ello oleadas de calor, de luz y de energía química; todo lo cual puede ser utilizado en la elaboración de nuevas formas de complejidad en las regiones circundantes. Y son justamente los flujos de energía libre de este tipo los que posibilitan el florecimiento de la vida en el planeta Tierra.

La gravedad había puesto en marcha la transformación de la materia y la creación de estrellas mediante la fusión de los protones, aunque para ello hubiera sido preciso vencer la barrera de sus cargas positivas. Se trata de un patrón evolutivo que veremos repetirse una y otra vez. Viene a ser un poco como esa matutina taza de café que nos ayuda a arrancar el día. Los químicos dan a esta inyección de energía inicial el nombre de «energía de activación»; como la energía de la cerilla que al prenderse desencadena una explosión. Las energías de activación pertenecen al tipo de las que son capaces de cambiar un parámetro y de liberar con ello otros flujos de energías libres de potencias muy superiores a las desencadenantes. En la narrativa de la formación estelar, la

gravedad es quien proporciona la energía de activación necesaria para la fusión de los protones, el surgimiento de las estrellas y la totalidad del proceso desatado a continuación.

Pero hay algo desconcertante en todo esto. ¿Qué ocurre con la segunda ley de la termodinámica? Si la entropía detesta las estructuras, ¿por qué permite que sigan apareciendo objetos complejos?

Si uno observa atentamente los flujos de energía advertirá que las estructuras complejas, como las estrellas, pagan un precio muy alto por esa complejidad. Fijémonos por ejemplo en la energía que genera la fusión. Lo primero que hace esta energía es apuntalar a la estrella y evitar que se extinga. Es como si se pagara una tasa a la entropía, un impuesto a la complejidad. Cuando deja de generar energía, la estrella se desmorona. La idea de un impuesto a la complejidad contribuye a explicar un importante fenómeno que ya señaló el astrofísico Eric Chaisson: *grosso modo*, el concepto señala que los fenómenos más complejos precisan de unos flujos de energía más densos, es decir, de una mayor cantidad de energía por gramo y por segundo. Chaisson calcula, por ejemplo, que la densidad de la energía que fluye en las sociedades humanas contemporáneas es aproximadamente un millón de veces superior a la densidad de la energía que fluye en el sol, mientras que la energía que fluye en la mayor parte de los organismos vivos se encuentra en algún punto entre esos dos extremos. Todo sucede como si la entropía exigiera más energía a una entidad en caso de que esta intente incrementar su propia complejidad. Los objetos más complejos tienen que procurarse y gestionar unos flujos de energía libre más intensos y elaborados que las cosas más simples. No es de extrañar que resulte más difícil crear y conservar las entidades de mayor complejidad, y tampoco que, por regla general, esa clase de entidades se estropeen o destruyan antes que las realidades más sencillas. Esta es una de las ideas que recorren la historia moderna

de los orígenes y en su momento resultará muy elocuente, ya que pueden decirnos muchas cosas respecto de las sociedades humanas de nuestra época.[2]

A la entropía le encanta este pacto porque, al final, la energía que sostiene a una estrella, como la energía de una catarata, se degrada cuando es librada al espacio circundante. Por consiguiente, pese a que la estrella esté ganando en complejidad, también está contribuyendo a que la entropía degrade la energía libre en simple calor. Esto es algo que tendremos ocasión de ver en todos los procesos de la historia moderna de los orígenes. El aumento de la complejidad no supone una victoria sobre la entropía. Paradójicamente, los flujos de energía que sostienen los objetos complejos (incluidos usted y yo) colaboran con la entropía en la materialización de su siniestro cometido, consistente, como sabemos, en malograr todas las formas de orden y estructura.

La aparición de nuevos elementos y el incremento de la complejidad química: umbral 3

Mil millones de años después del Big Bang, el universo, como si de un niño pequeño se tratara, empezaba ya a comportarse de una forma muy interesante. Aun así, desde el punto de vista químico la cosa era mucho más aburrida. No contenía más que hidrógeno y helio. El tercer umbral en el gradiente de complejidad que estamos estudiando daría lugar a la aparición de nuevas formas de materia: de hecho, a todos los demás elementos de la tabla periódica. Un universo provisto de más de noventa elementos diferentes puede hacer muchísimas más cosas que uno que solo cuente con hidrógeno y helio.

Si el hidrógeno y el helio habían sido los primeros elementos en surgir fue porque son los más simples. El hidrógeno tiene un solo protón en su núcleo, así que decimos que su número atómico es 1. El helio posee dos protones en su núcleo, de modo que su número

atómico es 2. En el momento en el que se emitió la radiación de fondo de microondas, unos 380.000 años después del Big Bang, también había, dispersos por el cosmos, un puñado de átomos de litio (cuyo número atómico es 3), así como unas pizcas de berilio (número atómico 4). Pero ahí acababa la cosa. Esos habían sido los únicos elementos creados en el Big Bang. Las condiciones Ricitos de Oro para la formación de un mayor número de elementos, con núcleos más grandes, eran en realidad muy simples: bastaba con disponer de una gran cantidad de protones y de unas temperaturas muy elevadas (unas temperaturas que solo se habían dado en el Big Bang, y habían cesado instantes después). Aun así, esas temperaturas se reproducirían en el dramático y conflictivo mundo de las estrellas agonizantes, en el preciso momento en el que empezaran a agotarse y a vacilar para finalmente desaparecer, al no poder seguir abonando los impuestos a la complejidad que exige la entropía.

Para comprender cómo las estrellas, en sus estertores de muerte, fabrican nuevos elementos, debemos entender primero cómo maduran y envejecen.

Las estrellas viven millones o miles de millones de años, así que es imposible asistir por completo a su proceso de crecimiento. Esta es la razón de que a los astrónomos que contemplaban el firmamento sin instrumentos —como los mayas, los pueblos del lago Mungo o los antiguos atenienses— les resultara imposible contar la historia de la existencia y el fallecimiento estelar en los términos actuales. La comprensión moderna de ese proceso se basa en investigaciones llevadas a cabo en todo el mundo mediante una serie de instrumentos y bases de datos concebidos en los dos últimos siglos. Esto ha permitido que los astrónomos compartan información sobre millones de estrellas en diferentes fases de su ciclo vital. Como dijo el cosmólogo inglés Arthur Eddington, la astronomía es como caminar por un bosque de plantones jóvenes, árboles maduros y especímenes antiguos, próximos a su final.[3] Al

estudiar los árboles y examinar las distintas fases de su evolución vital uno termina por imaginarse cómo es el proceso de su crecimiento, plenitud y muerte.

Para los astrónomos hay un mapa fundamental que reúne una enorme cantidad de información sobre las estrellas: el diagrama de Hertzsprung-Russell. Para los sabios que escudriñan el cielo este gráfico es el equivalente de los globos terráqueos que solía haber en todas las aulas escolares, y al igual que esos mapamundis también este esquema contribuye a dar sentido a grandes volúmenes de información.

El diagrama de Hertzsprung-Russell, creado en torno al año 1910, clasifica las estrellas en función de dos de sus propiedades más básicas. La primera de esas propiedades, representada en el eje vertical, es su magnitud, es decir, su brillo o luminosidad intrínseca (que en realidad indica la cantidad de energía que liberan al espacio), medida en comparación con la del sol. La segunda propiedad es su color, que es un reflejo de la temperatura de su superficie, estimada en grados kelvin (cuyo símbolo es K). Por regla general esta cifra se coloca en el eje horizontal. Y dado que ambas cantidades varían a lo largo de la vida de una estrella, la gráfica puede ayudarnos a comprender las biografías de los diferentes tipos de estrellas. Las diferencias más importantes que se registran en la crónica vital de los astros dependen fundamentalmente de un valor de carácter estadístico: la masa de la nube de materia que les dio origen. Las estrellas de mayor masa tienen biografías distintas a las de sus equivalentes de menor masa.[4]

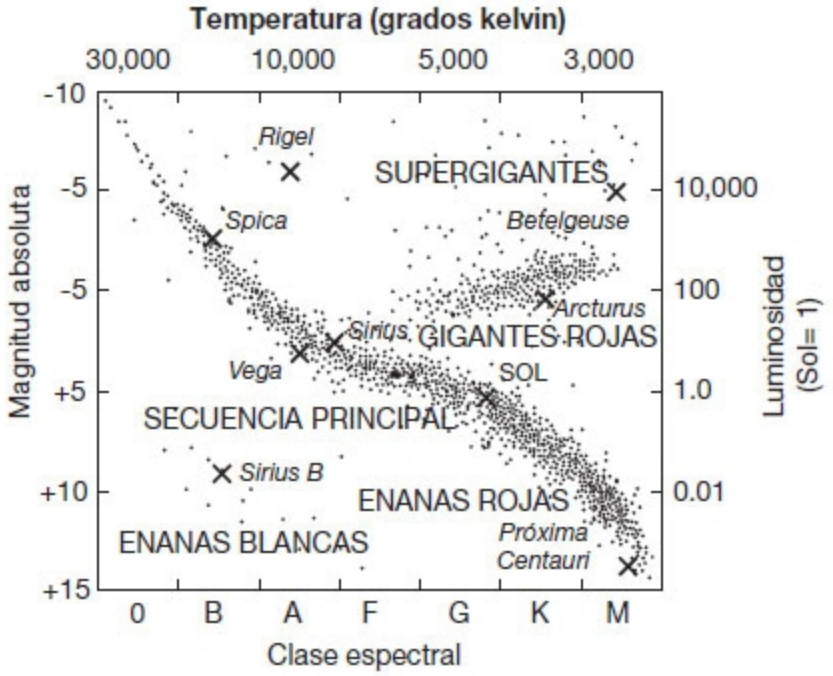


Diagrama de Hertzsprung-Russell, versión simplificada en la que figuran como ejemplo las posiciones aproximadas de diferentes tipos de estrellas.

En un diagrama de Hertzsprung-Russell, las estrellas más luminosas, es decir, las que emiten una mayor cantidad de energía, tienden a situarse en la parte superior del gráfico. Se trata por lo general de las estrellas de mayor masa. Los astros menos brillantes, como nuestra vecina Próxima Centauri, se encuentran en la porción inferior del esquema. Nuestro sol (cuyo resplandor se considera 1 por convención) se halla en la parte central. Las estrellas que muestran una temperatura superficial muy elevada se desvían hacia la margen izquierda del diagrama, y las de temperaturas externas más bajas aparecen al costado derecho.

El diagrama ofrece principalmente tres áreas de interés. La figura aparece atravesada por una ancha banda curvada que va del ángulo inferior derecho a la esquina superior izquierda: es la secuencia principal. La existencia de la mayor parte de las estrellas transcurrirá al 90 % en algún punto de esa secuencia principal. Su localización exacta en la figura dependerá de su masa, pero todas las estrellas

de la secuencia principal generan la energía que necesitan mediante la fusión de protones, lo que da lugar al surgimiento de núcleos de helio. Y eso es justamente lo que nuestro sol también está haciendo en este preciso momento. Es una estrella de mediana edad y todavía permanece en la secuencia principal. En la parte superior derecha del esquema aparecen las gigantes rojas, como Betelgeuse, ubicada en un extremo de la constelación de Orión. Estas estrellas son luminarias envejecidas que ya han gastado la mayor parte de los protones de su núcleo y ahora alimentan su caldera mediante la combustión de otros núcleos de mayor tamaño. Su superficie está más fría porque que se han expandido hasta tener un radio doscientas veces mayor que el de nuestro sol. Sin embargo, la cantidad total de luz que emiten es enorme debido a su formidable tamaño, y por eso aparecen en la parte superior del diagrama. La tercera región importante de la figura está en el ángulo inferior izquierdo, donde encontramos las enanas blancas. Se trata de antiguas gigantes rojas que perdieron la mayor parte de sus capas exteriores y no les queda más que un núcleo caliente y denso.

Cuando las estrellas se hacen muy, muy viejas terminan por agotar todo su caudal de protones libres, con lo que su núcleo empieza a llenarse de una ceniza hecha de protones fusionados o, en otras palabras, de núcleos de helio. La fusión de núcleos de helio exige unas temperaturas mucho más altas que la fusión de protones aislados, así que al final la caldera que bulle en el núcleo de la estrella deja de funcionar. Cuando esto ocurre, la gravedad toma el mando y la estrella se derrumba vencida por su propia masa. Pero aquí no acaba la historia. Una vez desmoronado el astro, su temperatura vuelve a aumentar porque la gravedad incrementa la presión. En las regiones más alejadas del núcleo, las capas externas de la estrella se expanden y se enfrían para mantener el equilibrio del sistema. A nuestros ojos, esos estratos exteriores de temperatura relativamente baja presentan una tonalidad encarnada, y por eso denominamos «gigantes rojas» a las estrellas que se encuentran en esa fase. Cuando nuestro sol alcance esa edad, se

dilatará hasta adquirir un volumen doscientas veces superior al actual, aproximadamente, con lo que vaporizará los planetas más cercanos, incluida la Tierra.

Si la gigante roja cuenta con la masa suficiente, la gravedad la comprimirá con tanta fuerza que su núcleo adquirirá una temperatura superior incluso a la que tenía cuando la estrella se hallaba en plena combustión. El calor llega a ser tan intenso que los núcleos de helio se empiezan a fundir y a generar núcleos de mayor peso atómico, como el carbono (que tiene seis protones) y el oxígeno (provisto de ocho protones). De este modo, la estrella vuelve a reactivarse, pero la fusión de núcleos de helio es un proceso más complejo que el de la fusión de protones y genera menos energía, lo que significa que las estrellas que se encuentran en esta fase tienen una esperanza de vida mucho más corta que las que hemos examinado hasta ahora. Las estrellas de grandes dimensiones pueden pasar por varias fases de expansión y contracción, como si hubieran entrado en un estado de agitación frenética. El carbono y el oxígeno se fusionarán para constituir una gama de elementos que va del magnesio al silicio y en último término llegarán a formar hierro. Durante el proceso del calentamiento estelar también se pone en marcha otro mecanismo mediante el cual algunos neutrones se convierten en protones, lo que permite la creación de nuevos tipos de núcleos. Así, el núcleo irá transformándose gradualmente en una enorme bola de hierro rodeada de capas formadas por otros elementos.

Y aquí termina la historia, porque no es posible generar energía mediante la fusión de núcleos de hierro. Al final, la mayoría de las estrellas se desprenderán violentamente de sus estratos externos y acabarán convertidas en enanas blancas, como podemos ver en el extremo inferior izquierdo del diagrama de Hertzsprung-Russell. Las enanas blancas son una especie de zombis estelares, pues poseen un corazón incapaz de actuar ya como caldera. Son sumamente densas: pensemos que si bien su tamaño es a menudo similar al de la Tierra, su masa es, sin embargo, equivalente a la del sol. Si

intentáramos levantar una cucharadita de café de la materia que integra las enanas blancas fracasaríamos estrepitosamente: pesaría como mínimo una tonelada.[5] En realidad, estos cadáveres estelares siguen calientes y pueden tardar varios miles de millones de años en enfriarse por completo. No obstante, han cumplido su cometido, ya que han fertilizado su entorno, dotándolo de nuevos elementos. Algunas enanas blancas sufren una muerte mucho más espectacular y desaparecen en la inmensa explosión de una supernova en caso de resultar absorbidas por las estrellas próximas. Estas explosiones generan una temperatura tan elevada que pueden generar muchos de los elementos de la tabla periódica. La fastuosa deflagración que pone fin a la agonía de estas enanas blancas produce lo que se conoce como supernovas de tipo 1a. Todas ellas estallan aproximadamente a la misma temperatura, de modo que si vemos una, conocemos enseguida la intensidad de su brillo, lo que a su vez significa que podemos estimar con exactitud la distancia a la que se encuentra. Las supernovas de tipo 1a permiten a los astrónomos calcular la posición de objetos situados a una distancia varios cientos de veces superior a la de las cefeidas variables.

Las estrellas cuya masa es unas siete veces mayor que la del sol también terminan sus días de manera espectacular: producen otro tipo de explosiones, conocidas como «supernovas de colapso gravitatorio». Una vez que el núcleo ha formado una bola de hierro de dimensiones superiores a las de nuestro sol, la caldera central se apaga definitivamente. Entonces, la gravedad aplasta de repente el núcleo, en una fracción de segundo y con una violencia inaudita, generando energías y temperaturas superiores a las de cualquier etapa anterior del ciclo vital de la estrella. Esta, que explota como una supernova, puede emitir brevemente tanta energía como una galaxia entera. En apenas unos minutos, la difunta estrella fabrica muchos de los elementos todavía inéditos de la tabla periódica y los dispersa con fuerza por el espacio circundante. Tal vez el ejemplo más célebre de una supernova de colapso gravitatorio sea la que ocupa el centro de la Nebulosa del Cangrejo. En el próximo millón de

años, es muy posible que Betelgeuse explote en forma de supernova: es una eventualidad que podría materializarse en cualquier momento.

En la mayoría de los casos, tras dispersar en forma de cataclismo la totalidad de sus capas exteriores, las supergigantes se contraen con tantísima violencia que los protones y los electrones quedan unidos por aplastamiento y terminan por formar neutrones. Una vez que sucede esto, la enorme masa globosa se comprime y da lugar a una estrella de neutrones, un objeto constituido por neutrones tan estrechamente unidos entre sí como las partículas de los núcleos atómicos. Esta forma de materia es muy poco frecuente y sumamente densa, dado que la mayoría de los átomos están fundamentalmente constituidos por espacio vacío. Una estrella de neutrones que tenga un diámetro de solo veinte kilómetros pesará el doble que nuestro sol, de modo que una cucharadita de café de la materia que compone una estrella de neutrones puede llegar a pesar miles de millones de toneladas. Disponemos de algunas pruebas que avalan la idea de que muchos de los elementos de mayor peso atómico de la tabla periódica pudieron haberse formado, no en las supernovas corrientes, sino en titánicas colisiones de estrellas de neutrones.

Las estrellas de neutrones dan vueltas sobre su eje a gran velocidad, un poco a la manera de los girofaros de emergencia. La existencia de este tipo de astros se detectó en 1967, cuando se observaron por primera vez una serie de destellos de energía que se sucedían a un ritmo muy acelerado. Estas estrellas rotatorias de neutrones reciben el nombre de «púlsares». Poco después de descubierto el primer púlsar se distinguió otro en el centro de la Nebulosa del Cangrejo y se llegó a la conclusión de que se trataba de los restos de la supernova que en 1054 ya habían registrado los astrónomos chinos. El púlsar de la Nebulosa del Cangrejo tiene aproximadamente el tamaño de una ciudad y rota sobre sí mismo treinta veces por segundo.

Las estrellas de mayor masa pueden tener otro desenlace aún más extraño. Los núcleos de estos astros implosionan de forma tan violenta que no hay nada capaz de resistir la presión, entonces el antiguo sol se transforma en un agujero negro, el tipo de objeto más denso de cuantos se conocen. Einstein predijo la existencia de los agujeros negros, y su densidad es de tal calibre que no hay nada que pueda sustraerse a la fuerza de gravedad que ejercen, ni siquiera la luz (lo que explica que sepamos tan poco sobre su composición interna). Los agujeros negros son unos monstruos astronómicos verdaderamente extraños, pero hoy tenemos un gran número de pruebas de su existencia. Si como todo parece indicar, las primeras estrellas de nuestro universo eran enormes, es muy probable que muchas de ellas implosionaran y crearan grandes agujeros negros; los cuales, a su vez, se convirtieron en una suerte de germen propicio para la formación de galaxias enteras, ya que estas se habrían ido agrupando a su alrededor un poco a la manera de las perlas, que se forman capa a capa en torno a un grano de arena. En la actualidad, los astrónomos son capaces de detectar la presencia de vastos agujeros negros en el centro de la mayoría de las galaxias, incluida la nuestra. Sus enormes campos gravitatorios pueden succionar las estrellas de los alrededores y triturarlas como si de gigantescas mandíbulas se tratara. Cuando una estrella es arrastrada más allá de la hipersuperficie frontera de un agujero negro (es decir, de lo que llamamos su «horizonte de acontecimientos») emite una enorme cantidad de energía, como si lanzara un alarido de muerte. Estos gritos agónicos dan lugar a unos objetos excepcionalmente brillantes a los que denominamos «cuásares».

La frontera u horizonte de acontecimientos de un agujero negro es un punto de no retorno. Constituye una barrera para nuestro conocimiento, pues es poquísima la información que logra escapar de las garras de este tipo de objetos. Aun así, podemos calcular aproximadamente la masa de la bola de materia que forma el agujero negro y su velocidad de rotación. Pero eso es casi todo

cuanto nos es dado hacer. Sin embargo, Stephen Hawking mostró que la influencia de un conjunto de tenues efectos cuánticos permite que el agujero negro deje escapar minúsculas cantidades de energía. Quizá también desprendan alguna información, pero de ser así no sabemos todavía cómo detectarla.

Así pues, las estrellas agonizantes enriquecieron y fertilizaron de diversos modos el joven universo. Una vez forjados en las estrellas que se aproximaban a su final y en las supernovas, los elementos de la tabla periódica comenzaron a aglomerarse en enormes nubes de polvo interestelar; los átomos se combinaron para dar lugar a moléculas simples y, más tarde, mediante una suerte de fermentación, cocinaron nuevas formas de materia.

Si sabemos tantas cosas acerca de las estrellas es porque los astrónomos han desarrollado técnicas para determinar lo que sucede en su interior, aunque se encuentren a millones de años luz de la Tierra. Ya hemos visto la gran cantidad de información que los astrónomos logran sonsacarle a la luz que emiten estos astros, pero la luz visible no es más que una minúscula parte de las energías que emiten las estrellas y las galaxias. Los modernos telescopios permiten a los científicos estudiar las emisiones estelares en todas las frecuencias del espectro electromagnético, desde las amplias y perezosas ondas de radio a los minúsculos e hiperactivos rayos gama. Los ordenadores facilitan el procesamiento de enormes volúmenes de información, y lo hacen, además, con gran precisión. Los telescopios orbitales, como el Hubble, permiten a los astrónomos observar el universo sin las distorsiones que genera la atmósfera terrestre. Los juguetes de los investigadores actuales nos transmiten una inmensa cantidad de datos sobre nuestro entorno galáctico.

Los aparatos más antiguos, como los telescopios ópticos y los espectroscopios, también tuvieron una tremenda relevancia. Las líneas de absorción que revelan los espectroscopios nos dicen qué elementos existen en el interior de las estrellas y en qué proporción se encuentran. ¿Le interesaría saber cuánto oro hay en el sol? Pues dirija su espectroscopio hacia la estrella, estudie las líneas de

absorción correspondientes al oro y mida la intensidad del tono oscuro que las representa. Descubrirá que el oro apenas constituye una billonésima parte de la masa total del sol. Sin embargo, la estrella de nuestro sistema es tan grande que si consiguiera usted extraer todo ese mineral se haría inmensamente rico porque obtendría mucho más oro del existente en todo el planeta Tierra.

Los astrónomos pueden determinar la temperatura de la superficie de una estrella tomando como base el color (o la frecuencia) de la luz que emite. Esto nos ha permitido saber, por ejemplo, que el calor en las capas externas de algunos de esos astros puede ser de apenas 2.500 grados kelvin o alcanzar nada menos que los 30.000 K. Y como ya hemos visto, los científicos también se encuentran en condiciones de calcular la cantidad total de luz que emite una estrella (es decir, su luminosidad). Para ello, proceden en primer lugar a medir su resplandor aparente, para ponderar a continuación el incremento de brillo que percibiría un observador situado más cerca de esa fuente de luz. Con esas dos mediciones (la de la temperatura superficial de la estrella y la de su luminosidad) se obtienen los datos básicos que permiten la elaboración del diagrama de Hertzsprung-Russell. Es frecuente, por último, que una vez conocida la luminosidad de una estrella se abra la posibilidad de calcular su masa. Hay también otras técnicas similares que nos permiten evaluar la distancia, las dimensiones, el movimiento y la energía de galaxias enteras.

En los últimos cincuenta años, todos estos métodos han contribuido a revolucionar nuestra comprensión de las estrellas y las galaxias. Nos han ayudado a entender la evolución de ambos tipos de objetos, la forma en que se desintegran y las vías que les llevan a generar un universo de mayor fertilidad química. De hecho, estas eran las cruciales condiciones Ricitos de Oro para la creación de moléculas complejas, capaces de formar objetos astronómicos de nuevo cuño, como la Tierra y su satélite.

Capítulo 3

MOLÉCULAS Y SATÉLITES: UMBRAL 4

«En verdad nada existe aparte de los átomos y el vacío.»

Demócrito

«Está usted en la Tierra. Y eso no tiene remedio.»

Samuel Beckett, *Final de partida*

Del polvo estelar a las moléculas

Hasta ahora hemos visto cómo una serie de procesos violentos que se sirven de energías extremadamente poderosas, guiados por las leyes fundamentales del universo, hicieron surgir galaxias, estrellas y nuevos elementos. Y lo consiguieron con el equivalente cosmológico de las esculturas hechas con sierra mecánica, pues la gravedad es un virtuoso escultor. En las inmediaciones de las estrellas, esta basta forma de labrar la materia generó nuevos entornos, y en ellos se abrió la posibilidad de realizar tallas más sutiles. Para comprender este novedoso tipo de estructuras debemos pasar de los objetos de dimensiones enormes a las cosas diminutas. Tenemos que centrarnos en las relaciones entre átomos.

La complejidad química depende de una serie de débiles flujos de energía electromagnética capaces de reorganizar individualmente los átomos y las moléculas. Sin embargo, esos delicados flujos de energía libre no suelen aparecer sino en ambientes protegidos, siendo por el contrario raros en sistemas Ricitos de Oro. Las

temperaturas elevadas destruyen las moléculas y los átomos, así que en el interior de las estrellas la complejidad química es imposible. Con todo, esa complejidad química requiere de la intervención de una cierta energía, de modo que también es inviable en la zona muerta del espacio profundo. El entorno ideal parece ser cerca de una estrella pero no demasiado, en regiones con flujos de energía libre constantes pero suaves.

Los seres humanos percibimos la gravedad, pero en el nanomundo que frecuentan los átomos la gravedad no tiene tanta importancia. Ni siquiera resulta relevante para los objetos pequeños, como las bacterias o los zapateros de río, a los que preocupa mucho más, respectivamente, la carga eléctrica del medio en el que viven o la tensión superficial del agua. A escala molecular, la fuerza dominante es la electromagnética, que aglutina o separa átomos y moléculas. Las moléculas y los átomos evolucionan en un pegajoso universo constituido por garfios, sondas, señuelos y lazos electromagnéticos.

La actividad química se inició en el interior de las nubes de polvo galáctico cuando estas se llenaron de elementos nuevos. Incluso en nuestros días, cerca del 98 % de la masa de esos celajes de ceniza interestelar están formados por hidrógeno y helio. Sin embargo, entre los átomos de hidrógeno y de helio aparecen, como espolvoreados, átomos de todos los demás elementos de la tabla periódica. En este sentido, los astrónomos han adoptado una nomenclatura un poco desconcertante, pues denominan «metales» a todos los elementos cuyo peso atómico es superior al del helio, con lo que indican que el universo se vuelve cada vez más metálico a medida que crece el número de defunciones de estrellas de grandes dimensiones. Del mismo modo, podría decirse que nuestro sol es más metálico que sus equivalentes de las anteriores generaciones de estrellas, dado que contiene un mayor número de metales.

Los espectroscopios pueden revelarnos qué elementos están presentes en las nubes galácticas y en qué cantidad, y nos permiten identificar moléculas, grupos de átomos que permanecen unidos en

virtud de las fuerzas electromagnéticas. Gracias al espectroscopio podemos saber, por ejemplo, si la nube contiene moléculas de agua en forma de hielo, o si cuenta con silicatos, esto es, con la categoría de minerales, fundamentalmente constituidos por silicio y oxígeno, que integra la mayor parte del polvo y las rocas de la corteza terrestre. Hoy sabemos que en las nubes de polvo galáctico hay un gran número de moléculas simples, y que algunas de ellas son cruciales para la vida en nuestro planeta, como por ejemplo los aminoácidos (es decir, los ladrillos con los que están hechas las proteínas).

La química es la disciplina que estudia cómo las fuerzas electromagnéticas construyen las moléculas y cómo a su vez los átomos se combinan y recombinan para dar lugar a la caleidoscópica diversidad material de nuestro mundo.

Las románticas citas de la química, o cómo se combinan los átomos

Los átomos son diminutos. En el punto ortográfico que remata esta frase cabría un millón de átomos de carbono. Pero no imagine que los átomos son bolas macizas de materia, pues de hecho, están formados casi enteramente por un espacio vacío. Todos los átomos disponen de un minúsculo núcleo en su punto central, constituido por protones (de carga positiva) y neutrones (que carecen de diferencial eléctrico), unidos gracias a la fuerza nuclear fuerte. El resto del átomo está vacío. En torno al núcleo orbitan, a enormes distancias, nubes de electrones —en número de uno por cada protón del núcleo, aproximadamente—. A principios del siglo xx, Ernest Rutherford, uno de los precursores de la física nuclear moderna, describió gráficamente las dimensiones del núcleo del átomo como «una mosca en una catedral».

La escala que sugiere Rutherford es casi correcta, pero llevó a cabo sus trabajos antes de que se produjera la gran evolución de la actual física cuántica, y esta mostró que su metáfora era en parte

engañosa. Los electrones son minúsculos, pues su masa equivale más o menos a 1/1836 de la de un protón. La física cuántica permitió comprender que resulta imposible conocer la velocidad o la posición exacta de los electrones. Podemos decir en qué lugar hay más probabilidades de que se encuentre un determinado electrón, pero nunca podremos señalar de manera concreta su situación específica, porque cualquier intento destinado a localizarlo exigirá utilizar energía (a modo de ejemplo, imaginemos que los iluminamos con una linterna para verlos), y los electrones son tan ligeros que la energía empleada para detectarlos alterará inevitablemente su velocidad y su trayectoria. Por eso los especialistas en física cuántica levantan la cartografía de los electrones en órbita nuclear dibujando una especie de «niebla de probabilidades» que se hace más espesa a ciertas distancias del núcleo y que se disipa de forma incompleta a otras. Esa niebla de probabilidades llena la práctica totalidad de la catedral atómica y puede filtrarse y salir al exterior de sus muros.[1]

La química se ocupa exclusivamente de las atracciones pasionales y los movimientos de repulsa que se producen en el seno de estas nieblas de probabilidades. Y no paran de ocurrir cosas. Entre los protones y los electrones se establecen lazos y vínculos que después se rompen; antiguos vínculos llegan a su fin y se inician relaciones nuevas... Y como resultado de toda esa agitación surgen nuevas formas de materia. El motor que anima tanta actividad obedece al simple hecho de que los electrones tienen cargas negativas que, si por un lado hacen que se repelan entre sí, por otro los atraen hacia las cargas positivas de los protones, ya se encuentren en el mismo átomo que ellos o en átomos vecinos. Los químicos se dedican al estudio de estas atracciones y repulsas, así como al análisis de los lazos y tensiones que surgen cuando los electrones se enganchan a los átomos vecinos para constituir moléculas por agregación de varios átomos —tantos que pueden llegar a contarse por millones o incluso miles de millones—, formando así estructuras de complejidad superior a la más compleja de las estrellas. Todas las pautas moleculares poseen propiedades

emergentes que les son característicamente propias, así que las posibilidades de la química parecen infinitas. No obstante, las relaciones de cortejo y atracción responden a unas leyes operativas particulares (a veces tan enrevesadas como las normas de los romances humanos) y son ellas las que rigen el desarrollo de la complejidad química, impulsada por la fuerza electromagnética.

Los electrones son los protagonistas de esta comedia. Tienen un comportamiento tan impredecible y voluble como los amantes humanos y, como ellos, permanecen abiertos a todas las ofertas tentadoras. Se arremolinan en torno a los protones en órbitas bien diferenciadas, cada una de ellas asociada a un nivel de energía distinto. Siempre que pueden, los electrones saltan a las órbitas más próximas al núcleo atómico, que es el que requiere un menor gasto de energía. Sin embargo, el número de espacios libres en cada órbita es limitado, y si no queda ningún hueco en las órbitas internas, a los electrones no les queda más remedio que resignarse a encontrar un sitio en alguna de las órbitas externas. Si de ese modo la órbita queda saturada por contener exactamente el número de electrones que le corresponde, todo el mundo se muestra feliz y contento. Esta es la situación de los llamados «gases nobles», como el helio o el argón, que figuran en la parte derecha de la tabla periódica. Estos elementos no se combinan con otros átomos debido precisamente a que están más o menos conformes con el *statu quo* del que disfrutan.

En cambio, si las órbitas exteriores de un átomo no están completas, se crea una situación incómoda y surgen problemas y tensiones. Los incesantes empujones y disputas que provoca este estado de cosas explican muchas de las peripecias de que es testigo la química. Hay electrones que se lían la manta a la cabeza y se embarcan rumbo a los átomos de las inmediaciones. Si lo hacen, el átomo que abandonan habrá perdido una carga negativa, así que podría emparejarse con un átomo que posea un electrón extra, formando de ese modo un enlace iónico. Este es el mecanismo que explica la formación de sales a partir de los átomos del sodio (cuyo

electrón más externo suele tener una manifiesta tendencia a saltar) y del cloro (que a menudo arde en deseos de añadir un electrón a la órbita más alejada de su núcleo). En algunas ocasiones, los electrones se sentirán más cómodos si orbitan en torno a dos núcleos, lo que implica que esos núcleos compartan *de facto* sus cargas, al quedar unidos mediante un enlace covalente. Este es el sistema que utilizan los átomos de hidrógeno y oxígeno para combinarse y formar moléculas de agua. Sin embargo, esa molécula es asimétrica, ya que tiene dos pequeños átomos de hidrógeno unidos en uno de los costados del átomo de oxígeno, cuyo tamaño es mucho mayor. Esa extraña silueta determina que las cargas negativas y positivas queden distribuidas de manera desigual en la superficie de la molécula, lo que confunde a los demás átomos de hidrógeno y logra frecuentemente que estos se sientan atraídos por los átomos de oxígeno de las moléculas vecinas. Y a su vez, esa atracción explica que las moléculas de agua puedan agruparse en gotas, dado que estas no podrían existir si no se explotaran las propiedades de esos enlaces débiles de hidrógeno. Los enlaces de hidrógeno desempeñan un papel fundamental en la química de la vida, pues tienen mucho que ver con la conducta de las moléculas genéticas, como el ADN. En los metales, los electrones se comportan de un modo muy distinto. Grandes nubes de electrones deambulan entre los núcleos metálicos, y por eso los metales conducen tan eficazmente las corrientes eléctricas, que en realidad son enormes flujos de electrones.

El carbono, con seis protones en su núcleo, es el donjuán de estos amores y desamores atómicos. Normalmente tiene cuatro electrones en su órbita externa, pero dispone de espacio suficiente para acoger a un total de ocho, de modo que el átomo de carbono puede alcanzar la felicidad de distintas maneras: bien perdiendo los cuatro electrones de su capa exterior, bien ganando cuatro electrones más, bien compartiendo los cuatro electrones de su superficie con otro átomo. Esto le permite disponer de un gran número de opciones, y por ello mismo el carbono puede constituir

moléculas complejas de formas exóticas, como los anillos o las cadenas. Su virtuosismo en el emparejamiento es lo que lo convierte en un elemento de suma importancia para la bioquímica.

Todo parece indicar que las leyes fundamentales de la química son universales. Lo sabemos porque los espectroscopios muestran que muchas de las moléculas simples que encontramos en la Tierra existen también en las nubes de polvo que flotan entre las estrellas. Aun así, la química interestelar da la impresión de ser bastante simple, porque hasta la fecha no se ha detectado en ese ámbito sideral ninguna molécula que posea más de un centenar de átomos. Y no es de extrañar. A fin de cuentas, en el espacio los átomos están muy distanciados unos de otros, de modo que les resulta muy difícil encontrar pareja. Además, las temperaturas son glaciales, así que hay muy poca energía de activación, que como acabamos de ver es imprescindible para que los átomos se animen a ligarse mediante uniones estables de larga duración. Lo más asombroso de la química interestelar es que no solo puede generar las moléculas simples que integran la materia de los planetas, como el agua y los silicatos, sino también muchas de las moléculas básicas de la vida, como los aminoácidos (que son los eslabones que componen las proteínas). De hecho, hoy sabemos que las moléculas orgánicas simples son un elemento común en el universo, y que eso aumenta las probabilidades de que exista vida más allá del planeta Tierra.

Umbral 4: de las moléculas a los satélites, los planetas y los sistemas solares

Las moléculas químicas simples que giran en torno a las estrellas jóvenes crean las condiciones Ricitos de Oro para cruzar un nuevo umbral en nuestra escala de complejidad creciente, puesto que gracias a ellas se fabrican los ladrillos con los que se levanta un conjunto de objetos astronómicos completamente inexistentes hasta ahora: el de los planetas, los satélites y los asteroides. Los cuerpos

celestes que llamamos «planetas» poseen una diversidad química muy superior a la de las estrellas, y además están mucho más fríos, así que son los entornos Ricitos de Oro ideales para el funcionamiento de la química compleja. Y hay al menos un planeta (el nuestro) —aunque probablemente existan muchos más— en el que la química ha conseguido alumbrar finalmente formas de vida.

Durante mucho tiempo, se supuso que en el cosmos solo había un sistema solar, pero en 1995 los astrónomos identificaron la presencia de «exoplanetas», planetas que orbitan en torno a otras estrellas de nuestra galaxia. Lo consiguieron al detectar minúsculas oscilaciones en el movimiento de las estrellas, o variaciones casi insignificantes de su intensidad luminosa (producidas por la leve disminución de su brillo cuando un planeta se interpone entre el observador y el astro). Desde entonces hemos podido comprobar que la mayor parte de las estrellas cuentan con planetas, lo que significa que podrían existir decenas de miles de millones de sistemas planetarios de muy diferentes tipos; y esto solo en nuestra galaxia. A mediados de 2016, los astrónomos habían identificado ya más de tres mil exoplanetas. En las próximas dos décadas, el estudio de otros sistemas planetarios debería permitirnos adquirir una mejor comprensión de sus configuraciones más habituales. Es muy probable que en poco tiempo seamos capaces de analizar su atmósfera, y eso podría hacernos entrever cuántos de esos exoplanetas son potencialmente aptos para albergar vida. Ya sabemos que muchos de ellos tienen un tamaño similar al de la Tierra, y que la distancia que media entre la estrella del sistema al que pertenecen otros, igualmente numerosos, y la órbita en la que giran es idónea para la existencia de agua en estado líquido (y nadie duda de lo crucial que resulta para la vida este ingrediente).

El descubrimiento de exoplanetas nos indica que la evolución ha cruzado varias veces el umbral número 4 y que otro tanto puede decirse del número 3. Además, es muy posible que esa cuarta frontera se rebasara por primera vez en un período muy temprano

de la historia del universo, aunque en torno a una estrella que acaso jamás alcancemos a detectar. Aun así, ahora sabemos muchísimas cosas acerca del aspecto que presenta la superación de ese umbral.

La aparición de los sistemas planetarios es un proceso desordenado y caótico, una suerte de subproducto de la formación de estrellas surgido en unas regiones del cosmos que previamente habían sido fecundadas desde el punto de vista químico. Miles de millones de años después del Big Bang, el espacio interestelar empezó a llenarse de nubes de materia compuestas por un gran número de elementos químicos distintos. El hidrógeno y el helio seguían constituyendo casi el 98 % de esas nubes, pero el factor que marcaría la diferencia fue ese 2 % restante. Como ya sucediera en el universo primitivo, la gravedad se entretuvo compactando esos cúmulos de materia. Es posible que en la región que actualmente habitamos la gravedad contara con la ayuda de la explosión de una supernova cercana, que aceleró las cosas e inició la contracción de una inmensa nube de gas y polvo hace unos 4.567 millones de años. La supernova dejó una tarjeta de visita en forma de materiales radioactivos, como vemos en los meteoritos que recorren nuestro sistema solar.

Al contraerse, la nube de polvo se disgregó y dio lugar a diversas nebulosas solares, una de las cuales acabaría dando nacimiento a nuestro sol. Este absorbió el 99,9 % de la materia inicialmente contenida en la nube de polvo que había propiciado su aparición. Sin embargo, lo que ahora nos interesa son justamente los residuos, es decir, los anillos de escombros que comenzaron a girar en torno al recién nacido sol. A medida que la gravedad fue contrayendo la nebulosa solar, el enorme remolino de gas, polvo y partículas de hielo empezó a rotar cada vez más deprisa, hasta que las fuerzas centrífugas lo aplanaron, como si de una enorme masa de *pizza* se tratara, y el resultado fue el delgado plano del sistema solar que hoy conocemos. Actualmente podemos observar esos discos

protoplanetarios en las regiones próximas a nosotros en las que todavía se forman estrellas (y eso nos indica que tales discos son un fenómeno muy común).

Dos procesos convirtieron ese disco de materia en rotación en un conjunto de planetas, satélites y asteroides. El primero podría considerarse una especie de selección química. Las violentísimas y ardientes lenguas de partículas cargadas —conocidas con el nombre de «viento solar»— que emitía el joven sol dispersaron los elementos más ligeros, como el hidrógeno y el helio, empujándolos lejos de las órbitas internas y creando dos regiones bien diferenciadas. Las zonas exteriores del recién estrenado sistema solar estaban compuestas fundamentalmente por los elementos primordiales (hidrógeno y helio), como la mayor parte del universo. Sin embargo, las zonas interiores, más próximas al sol, donde acabarían surgiendo los planetas telúricos (Mercurio, Venus, Tierra y Marte), al haber perdido una gran cantidad de hidrógeno y helio, poseían una rara diversidad química. El 80 % de la corteza terrestre está formado por oxígeno, silicio, aluminio y hierro, aunque hay también otros elementos, como el calcio, el carbono y el fósforo que desempeñan un papel de menor importancia. En la Tierra, el papel del hidrógeno es modesto, y encontrar helio es raro.

El segundo proceso que dio lugar a la aparición de nuestro sistema solar fue la acreción. En las diferentes órbitas que a modo de anillos rodeaban ese sol de corta edad, poco a poco los trozos de materia fueron agrupándose. En las regiones exteriores, de naturaleza básicamente gaseosa, el proceso debió de ser bastante suave. La gravedad fue reuniendo la materia hasta constituir enormes planetas gaseosos, como Júpiter y Saturno, integrados casi por completo por hidrógeno y helio, aunque levemente entreverados de polvo y hielo. Sin embargo, en las zonas interiores la acreción se produjo de un modo más violento y caótico, dado que en ellas había mucha más materia sólida. Las partículas de hielo y polvo se aglomeraron hasta formar bolas de roca y elementos congelados. Estos pedazos de materia orbitaban a gran velocidad y si bien

algunas veces chocaban entre sí y se rompían en mil pedazos, otras se adherían para generar objetos de mayor tamaño. Al final aparecieron masas mucho más grandes aún, como los meteoros y los asteroides, repitiéndose en cada órbita el proceso de fragmentación o fusión hasta crear objetos extremadamente voluminosos; tanto, que su gravedad empezó a atraer a buena parte de los residuos restantes. En última instancia, la suma de esas peripecias dio lugar a los planetas que hoy vemos, espaciados a intervalos precisos, cada uno en una órbita concreta en torno al sol.

Toda esta explicación apenas logra transmitir el inmenso y violento caos que supuso la acreción. Algunos objetos atravesaban oblicuamente las órbitas y golpeaban a esos planetas y satélites todavía tiernos, trastornando su alineación o haciéndolos añicos. Es muy probable que el titánico protoplaneta que llamamos Júpiter emigrara a las regiones interiores y su fuerza gravitatoria hiciera saltar por los aires a cualquier aspirante a planeta que pudiera estar formándose en lo que hoy constituye el cinturón de asteroides. También es probable que la extraña inclinación de Urano y las no menos insólitas características de su rotación sean consecuencia de una violenta colisión con otro vasto cuerpo celeste. Y el recortado e irregular perfil de muchos asteroides corresponde a la cicatriz dejada por los brutales choques ocurridos en las fases más tempranas de la historia de nuestro sistema solar.

Las colisiones continuaron produciéndose durante muchísimo tiempo, incluso después de estabilizado el sistema solar. De hecho, es muy probable que nuestra propia luna se formara a partir de un choque entre una Tierra todavía joven y un protoplaneta del tamaño de Marte (llamado Tea), choque que se habría producido aproximadamente cien millones de años después del nacimiento de nuestro sistema solar. Esa colisión generó y puso en órbita terrestre una inmensa nube de materia, que muy posiblemente permaneció mucho tiempo girando en torno a nuestro planeta al modo de los actuales anillos de Saturno (que también podrían ser los restos de

un satélite que acabó pulverizado), hasta que finalmente la ingente masa de residuos se aglomeró, siguiendo el ya conocido proceso de acreción, y dio lugar a la luna.

En el plazo de cincuenta millones de años, nuestro sistema solar adquirió la forma que todavía mantiene en nuestros días, y lo cierto es que desde entonces el conjunto se ha revelado bastante estable. Probablemente, los miles de millones de sistemas planetarios que existen en nuestro universo se materializaran del mismo modo, aunque presentan una gran diversidad de configuraciones diferentes. No obstante, lo indudable es que todos los cuerpos planetarios muestran una temperatura muy inferior a la de las estrellas y que desde el punto de vista químico son más fértiles y diversos que ellas, razón por la que han podido presentar las condiciones Ricitos de Oro susceptibles de abrir la puerta a la constitución de nuevas formas de complejidad. Al final, al menos uno de esos objetos, pero probablemente muchos más, se reveló capaz de engendrar vida.

El planeta tierra

Nuestro sistema solar se encuentra en una galaxia a la que denominamos Vía Láctea, en un barrio estelar situado a su vez en uno de los brazos espirales de esa gran agrupación de estrellas: el brazo de Orión. La Vía Láctea pertenece a un grupo formado por unas cincuenta galaxias, conocidas con el poco evocador término de Grupo Local. El Grupo Local se halla ubicado a su vez en las regiones externas del Cúmulo de Virgo, que reúne aproximadamente unas mil galaxias. El Cúmulo de Virgo forma parte del Supercúmulo Local, compuesto por varios centenares de grupos galácticos. Para cruzar de un lado a otro de este Supercúmulo Local deberíamos viajar a la velocidad de la luz durante cien millones de años. En 2014 se descubrió que el Supercúmulo Local es solo una parte de un vastísimo imperio cósmico que posiblemente dé cabida a unas cien mil galaxias, y quien pretenda recorrer ese inmenso páramo deberá

prepararse para una travesía de cuatrocientos millones de años, siempre a la velocidad de la luz. Este grandísimo feudo es el Supercúmulo de Laniakea (palabra que en lengua hawaiana significa «cielos inconmensurables»). Es la mayor entidad estructurada que hasta ahora conocemos. Suponemos que Laniakea se afianza sobre un andamiaje de materia oscura cuya atracción gravitatoria mantiene unidas, pese a la expansión general del universo, todas esas galaxias.

Volvamos a los barrios periféricos de Laniakea, a nuestro propio grupo local, a la galaxia que habitamos, y recalemos en el brazo de Orión, donde se encuentran nuestro sol y el planeta Tierra. Una vez constituida la Tierra por acreción, un último ejemplo de escultura con motosierra terminaría de conferirle su característica estructura interna. Los geólogos denominan «diferenciación» a este proceso final.

La forma juvenil de nuestro globo se calentó tanto que acabó fundiéndose. Tres evoluciones confluyentes dieron origen a ese drástico aumento de temperatura: la vinculada con las violentas colisiones del proceso de acreción, la asociada con la presencia de elementos radioactivos (generados por la supernova que dio lugar a buena parte de los materiales de nuestro sistema solar), y la derivada del incremento de presión, debido a su vez al agrandamiento del joven planeta. Al final, la dinámica Tierra se calentó tanto que sus materiales entraron en fusión y quedaron convertidos en una especie de masa pegajosa. Además, al licuarse, sus diferentes estratos se distribuyeron espontáneamente por orden de densidad y dieron al planeta la estructura que actualmente tiene.

Los elementos más pesados, en particular hierro y níquel, junto con un poco de silicio, se hundieron en aquel légamo ardiente y acabaron formando el núcleo metálico que consolida el centro de la Tierra. Debido a la rotación del planeta, el núcleo comenzó a generar un campo magnético que actúa como elemento de protección de la superficie terrestre, a la que evita los daños que de otro modo provocarían las partículas cargadas que arrastra el viento

solar. Otros minerales más ligeros, como los pertenecientes al grupo del basalto, se amontonaron en torno al núcleo y formaron una segunda capa que en realidad delimita una región de tres mil kilómetros de profundidad integrada por rocas a medio fundir mezcladas con gas y agua (región que conocemos como «manto»). De ahí procede la lava que escupen los volcanes. Las rocas más ligeras, generalmente granito de distintos tipos, afloraron a la superficie, donde se solidificaron al enfriarse y constituyeron una tercera capa: el finísimo estrato que denominamos «corteza» y que actualmente cubren los océanos y los continentes (de hecho, ese estrato es tan delgado que en relación al volumen del planeta equivale a una cáscara de huevo). Bajo los mares, la corteza apenas supera los cinco kilómetros de espesor, pero bajo los continentes puede llegar a alcanzar los cincuenta. Desde el punto de vista químico, la corteza resulta muy interesante, pues en ella se encuentran sólidos, líquidos y gases. Se trata además de una capa que ha experimentado una larga sucesión de oscilaciones de temperatura debidas al encadenamiento de erupciones volcánicas e impactos de asteroides. Esto, añadido al tremendo resplandor del joven sol y a la condensación de los primeros océanos de la Tierra, fue provocando una oscilación de períodos de calentamiento seguidos de otros de enfriamiento. Tanto en la corteza como en el manto, el calor y la circulación de elementos debió de generar unos doscientos cincuenta nuevos tipos de minerales.[2] Los gases, entre los que destacan el dióxido de carbono y el vapor de agua, salían borboteando al exterior, procedentes del manto, por las chimeneas de los volcanes y las grietas de la superficie hasta acabar formando un cuarto estrato: el de la primera atmósfera terrestre. Tanto la corteza como la atmósfera se vieron enriquecidas con la aportación de gases, agua, moléculas complejas y otros materiales llegados a nuestro planeta a bordo de asteroides y cometas.

Con este proceso que permitía que la energía del centro de la Tierra se abriera paso por todo el planeta, el núcleo caliente y fundido consiguió alimentar la recién constituida dinámica terrestre,

puesto que contribuía a calentar y a batir sus estratos superiores, generando un manto recorrido por un conjunto de corrientes de roca reblandecida y una superficie tachonada de bocas volcánicas. El intenso calor del núcleo todavía continúa impulsando la aparición de cambios en los niveles superiores del planeta Tierra. En nuestros días, aún es posible seguir la pista de los movimientos de la superficie terrestre utilizando los sistemas GPS, y sabemos que las placas tectónicas deambulan de un lado a otro con un ritmo aproximadamente igual al del crecimiento de las uñas de una persona. Las más veloces circulan a una velocidad de unos 25 centímetros anuales.

Los geólogos dividen la historia de la Tierra en etapas, la mayor de las cuales es el eón. El primero de estos períodos recibe el nombre de eón Hádico (su nombre procede de Hades, es decir, «infierno»), que se inició con la formación de la Tierra y terminó hace unos cuatro mil millones de años (momento en el que arranca el eón Arcaico). Si hubiéramos visitado la Tierra en la época del eón Hádico habríamos encontrado un planeta abrumado aún por los efectos del arrebato demoledor que supuso el proceso de acreción. Los cráteres y cicatrices que podemos apreciar en la superficie de la luna y de otros planetas muestran que si retrocediéramos entre 4.000 y 3.800 millones de años veríamos que la región interior del sistema solar estaba sometida al titánico martilleo de los asteroides y otros objetos sin rumbo. Es lo que se conoce como «bombardeo intenso tardío», y es muy posible que su causa fuesen los cambios que por entonces estaban registrando las órbitas de Júpiter y Saturno (cuya inmediata consecuencia fue una aleatoria dispersión de rocas por todo el joven sistema solar). En la actualidad, la mayoría de los asteroides se encuentran entre Júpiter y Marte, así que podría tratarse de los ladrillos y pilastras de un planeta que no llegó a construirse debido a la perturbadora influencia de la fuerza gravitatoria de Júpiter. Hoy sabemos que existen unos trescientos mil

asteroides. Y aunque en su mayoría sean pequeños, lo cierto es que no deja de ser una gran cantidad de materia errante susceptible de impactar contra los planetas de las regiones interiores.[3]

El estudio de la Tierra: los sismógrafos y la datación radiométrica

Pese a lo que Hollywood pueda habernos inducido a creer, no es posible excavar a grandes profundidades en nuestro planeta. La perforación más honda que se ha llevado a cabo penetró unos doce kilómetros en el subsuelo, lo que representa aproximadamente el 0,2 % de la distancia que nos separa del núcleo terrestre. Se hizo en la península de Kola, en el extremo noroccidental de Rusia, en el marco de una investigación geológica. Se ha logrado más información acerca del interior del planeta mediante otro espléndido truco científico: el equivalente geológico de los rayos X. Los terremotos generan temblores que recorren la masa terrestre, y los sismógrafos miden esas sacudidas en diferentes puntos de la superficie. Comparando los resultados obtenidos en distintas regiones del globo podemos hacernos una idea tanto de la velocidad con la que esas vibraciones recorren el interior de la Tierra como de la distancia que cubren. Sabemos también que los diferentes tipos de ondas sísmicas se desplazan a distintas velocidades en función de las diversas clases de materiales que atraviesan, y que hay algunas que solo pueden propagarse en medios sólidos, mientras que otras pueden difundirse también a través de los líquidos. Por consiguiente, el seguimiento de esas convulsiones telúricas mediante un gran número de sismógrafos puede darnos mucha información sobre las características del interior de la Tierra.

La determinación de la edad de la Tierra, así como el establecimiento de las otras muchas fechas que jalonan la historia moderna de los orígenes, solo ha podido emprenderse en la segunda mitad del siglo xx, ya que ha sido necesario disponer de una serie de métodos científicos muy astutos.

Los primeros pasos de la elaboración de la historia moderna del planeta Tierra datan del siglo XVII. Fue entonces cuando algunos de los precursores de la geología actual comprendieron que tal vez existiera la posibilidad de determinar el orden en que se habían producido los acontecimientos de la historia de la Tierra, aunque nadie conociera exactamente el momento en que esos hechos se habían producido. En el siglo XVII, Nicolás Steno, un sacerdote danés que vivía en Italia, demostró que si se estudiaban minuciosamente las rocas sedimentarias podía establecerse el orden en el que se habían ido depositando sus diferentes estratos. Todas las rocas sedimentarias se forman capa a capa, así que sabemos que, en condiciones normales, las más antiguas tienen que ser las inferiores. Y cualquier cosa que las atraviese ha de pertenecer necesariamente a una época más reciente.

A principios del siglo XIX, un topógrafo inglés llamado William Smith demostró que en las formaciones rocosas presentes en distintos puntos geográficos se apreciaba la presencia de una misma secuencia fósil. Partiendo del razonable supuesto de que los fósiles de apariencia análoga debían de haberse originado en una época similar, se podía identificar un vasto conjunto de formaciones rocosas repartidas por el mundo y constituidas por estratos depositados en la misma fecha. La combinación de estos principios permitió a los geólogos del siglo XIX concebir una cronología relativamente exacta de la historia de la Tierra, que constituye el fundamento de los modernos sistemas de datación geológica. La sucesión temporal se inicia en el período Cámbrico, que es el primero dotado de estratos con fósiles visibles a simple vista.

No obstante, nadie sabía en qué momento había tenido lugar esa era cambriana, y muchos geólogos perdieron la esperanza de conseguir fijar algún día la fecha exacta de los diferentes estratos, así que llegaron a creer que tendrían que contentarse con valorar su antigüedad relativa. En 1788 James Hutton expresaba de este modo su consternación: «No hallamos vestigio de comienzo alguno ni perspectiva de ningún final».[4] La única forma de establecer de

manera categórica la fecha de un acontecimiento era encontrar algún elemento escrito en el que apareciese mencionado, y esto fue así durante mucho tiempo, incluso en los primeros tiempos del siglo xx. Como señaló H. G. Wells después de la primera guerra mundial al intentar elaborar una historia moderna de los orígenes, esta situación llevaba aparejada la imposibilidad de lograr que las cronologías absolutas se remontaran más allá de unos cuantos miles de años.

Aunque H. G. Wells lo ignorara, lo cierto es que ya entonces se habían realizado algunos de los descubrimientos llamados a propiciar, con el tiempo, la determinación de unas dataciones más precisas. La clave de bóveda que permitió esa hazaña fue la radioactividad, una forma de energía descubierta en 1896 por Henri Becquerel. En los átomos que poseen núcleos de gran tamaño, como el uranio, las fuerzas de repulsión del abundante número de protones cargados positivamente pueden desestabilizar el núcleo hasta conseguir que este se desintegre espontáneamente, emitiendo con ello electrones de alta energía, fotones, o incluso núcleos de helio completos. Al producirse la eyección de importantes trozos del núcleo original, el elemento se transforma en otros distintos, todos ellos provistos, obviamente, de un menor número de protones. El uranio, por ejemplo, acaba descomponiéndose hasta convertirse en plomo. En la primera década del siglo xx, Ernest Rutherford advirtió que, pese a la imposibilidad de saber en qué instante preciso habría de desintegrarse un núcleo en particular, lo cierto era que la emisión radioactiva constituía un proceso muy regular cuando lo que se observaba era el promedio de su ocurrencia en miles de millones de partículas. Todos los isótopos de un mismo elemento (los isótopos tienen el mismo número de protones, pero diferente cantidad de neutrones) se desintegran a ritmos distintos pero regulares, de modo que puede determinarse con precisión cuánto tardará en descomponerse la mitad de los átomos de un isótopo dado. Pondré un ejemplo: el período de semidesintegración del uranio 238 (que

tiene 92 protones y 146 neutrones) es de 4.500 millones de años, mientras que el del uranio 235 (que cuenta con 92 protones y 143 neutrones) es de 700 millones de años.

Rutherford comprendió que la desintegración radioactiva podía ofrecer a la ciencia una suerte de reloj geológico si encontraba el modo de medir el grado de descomposición de una muestra determinada. En 1904, intentó valorar la desintegración de una muestra de uranio y obtuvo una lectura que le indicaba que la edad de la Tierra era de unos quinientos millones de años. La idea básica era correcta, pero su estimación de la antigüedad del planeta resultó muy polémica porque señalaba una cifra muy superior a la de la edad hasta entonces aceptada, que se situaba por debajo de los cien millones de años.

Con el tiempo fue creciendo de forma imparable el número de geólogos que coincidían en que la Tierra debía de ser mucho más vieja de lo que se había creído hasta entonces, pero la medición de la descomposición radioactiva planteaba una serie de problemas técnicos verdaderamente formidable. De hecho, no lograrían resolverse hasta finales de la década de 1940, y para ello hubo que echar mano de los métodos desarrollados en el marco del Proyecto Manhattan, destinado a fabricar la primera bomba atómica. Para producir el artefacto era necesario separar varios isótopos del uranio para obtener muestras purificadas de uranio 235. Un físico estadounidense llamado Willard Libby contribuyó a concebir las técnicas para conseguir la separación y la medición de esos distintos isótopos, y su trabajo acabó revelándose crucial para la valoración de la descomposición radioactiva.

En 1948, el equipo de Libby se las ingenió para datar con precisión el material extraído de la tumba del faraón Zoser, que les había sido confiado por el Museo Metropolitano de Arte de Nueva York.[5] Para lograrlo utilizaron el carbono 14, un isótopo radioactivo del carbono cuyo período de semidesintegración es de 5.730 años, lo que lo convierte en una herramienta muy útil para establecer la edad de cualquier resto de materia orgánica (como, por ejemplo, la

madera). Los distintos elementos radioactivos se revelaron adecuados para trabajar a diferentes escalas y con varias clases de materiales. Para los geólogos, la descomposición del uranio en plomo resultó particularmente valiosa, y el hecho de que los diversos isótopos del uranio se desintegraran a ritmos desiguales les permitió realizar pruebas cruzadas para verificar sus deducciones.[6] En 1953, Clair Patterson estableció la edad de un meteorito férrico valiéndose de la disgregación del uranio en plomo. Supuso acertadamente que los elementos que entraban en la composición de los meteoritos procedían de la materia primordial que en su día había integrado el joven sistema solar, y de ese modo pudo averiguar la edad de la estrella y los planetas del mismo. Sus mediciones sugerían que la Tierra tenía unos 4.500 millones de años, lo que significaba que su antigüedad era muy superior incluso a lo que Rutherford había estimado. La datación de Patterson sigue vigente en la actualidad.

Además de las técnicas de datación radiométrica han surgido otras formas de determinar la edad de los objetos, lo que a su vez permite comprobar con unos métodos los resultados que se obtienen con otros. A veces las fechas comprendidas en los últimos milenios pueden establecerse mediante el simple expediente de contar los anillos de los árboles, porque los hay antiquísimos, como por ejemplo los pinos longevos del suroeste de Estados Unidos, que pueden vivir varios miles de años. Los astrónomos recurren a toda una serie de técnicas propias para determinar las fechas clave de la historia del universo, y los biólogos han descubierto que la evolución del ADN se produce a un ritmo bastante regular, de modo que es posible establecer, siquiera a grandes rasgos, en qué momento se separaron las ramas de dos especies hoy distintas de su antepasado común mediante la medición de las diferencias que presentan sus genomas. Estas técnicas, que no solo se basan en el minucioso estudio de un vasto conjunto de procesos (como la desintegración radioactiva), sino que exigen la concepción de instrumentos nuevos

con los que poder llevar a cabo las precisas mediciones que se requieren, nos han permitido conocer la cronología que marca los principales hitos de la historia moderna de los orígenes.

Hasta ahora nos hemos limitado a contemplar el incremento de la complejidad en diferentes entidades que, pese a ser muy interesantes, no están vivas. Llegamos a uno de los umbrales más importantes de todos cuantos hemos descubierto: el de la aparición de los organismos vivos. Al estudiar la vida nos encontramos ante una complejidad cuyo tipo y grado no solo son nuevos, sino también diferentes por completo a los que hemos conocido hasta aquí, lo que a su vez nos llevará a manejar una larga serie de conceptos nuevos, de entre los que destacan la información, el propósito y en último término incluso la conciencia.

SEGUNDA PARTE

LA BIOSFERA

Capítulo 4

VIDA: UMBRAL 5

VIDA E INFORMACIÓN: UN NUEVO TIPO DE COMPLEJIDAD

> «Pasé la tarde sumido en meditaciones sobre lo vivo. ¡Qué cosa tan extraña es la vida, si se para uno a pensarlo! Ya sabe, es tan distinta a todo lo demás...; no sé si me explico...»
>
> P. G. Wodehouse, *El inimitable Jeeves*

> «Lo que se halla en el interior de todo ser viviente no es un fuego ni un cálido aliento ni una "chispa de vida". Son informaciones, palabras, instrucciones... Si uno quiere entender la vida, no debe pensar en vibrantes y pulsátiles gelatinas y exudados, sino en la tecnología de la información.»
>
> Richard Dawkins, *El relojero ciego*

La vida que hoy conocemos surgió del exótico caldo químico de los distintos entornos del joven planeta Tierra, que rebosaba de elementos, hace unos cuatro mil millones de años. Si en algún otro lugar del universo existe vida, es muy posible que tenga un aspecto tan extraño que ni siquiera seamos capaces de reconocerla como tal. Sin embargo, lo que permite la existencia de vida en el planeta Tierra es la intrincada disposición de los miles de millones de nanomáquinas moleculares que la componen. Tales sistemas trabajan y cooperan en el interior de una serie de estructuras

protectoras, similares a una burbuja, que constituyen, según pensamos, los ladrillos fundamentales de la vida, es decir, las unidades estructurales básicas que determinan la funcionalidad y las características biológicas de todos los organismos vivos que conocemos. Estas burbujas protectoras reciben el nombre de «células», palabra que proviene del latín *cella*, que significa «habitación o aposento pequeño». Las células son las unidades de menor tamaño con que cuenta el mundo vivo, y tienen la propiedad de replicarse de forma independiente. Consiguen sobrevivir gracias al aprovechamiento de los sutiles flujos de nutrientes y la utilización de la energía libre que encuentran en el medio en el que viven.

La vida tuvo un impacto colosal en nuestro planeta debido a que los organismos vivos hacen copias de sí mismos y a que estas pueden multiplicarse, diseminarse, proliferar y diversificarse. En el transcurso de los últimos cuatro mil millones de años, un ciclópeo ejército de organismos vivos ha transformado la Tierra y creado lo que denominamos «biosfera»: una fina capa que recubre la superficie del planeta y que está formada tanto por el conjunto de los seres vivos como por todo aquello que estos hayan moldeado, alterado o dejado tras de sí a lo largo de su existencia.

Pero la vida tiene algo muy extraño, pues a pesar de que el interior de cada célula parezca un verdadero pandemonio (una especie de competición de lucha en el barro en el que participan millones de moléculas), las células mismas dan la impresión de actuar con un objetivo concreto. En el seno de las células hay algo que parece impulsarlas, como si estas pequeñas burbujas autónomas se esforzaran en cumplimentar uno a uno los puntos de un listado de tareas pendientes muy sencillo: 1) permanecer con vida a pesar de la acción de la entropía y del impredecible carácter del medio; y 2) hacer copias de mí misma capaces de hacer otro tanto. Y esto se repite en todas y cada una de las células y en el conjunto de sus generaciones sucesivas. Y justamente aquí, en la procura de ciertos resultados y la evitación de otros, reside el origen de los deseos, las preocupaciones, las decisiones, la ética e incluso

el amor. E incluso es posible que sean estas también las raíces del significado, si por tal cosa entendemos la capacidad de discriminar entre el sentido de distintos acontecimientos y señales. Por ejemplo: ¿qué debo deducir del hecho de que un gran tiburón blanco se dirija hacia mí?

La aparición (o, quizás, ilusión de aparición) de la determinación constituye una novedad. Es una característica que no posee ninguna de las entidades complejas que hemos visto hasta ahora. ¿Tendría algún sentido decir que las estrellas se plantean objetivos? ¿Podría afirmarse que los planetas o los peñascos persiguen una meta? ¿O que el universo obedece a un propósito? La verdad es que no, al menos no si nos mantenemos dentro de los márgenes que marcan las convenciones de la historia moderna de los orígenes. Sin embargo, los seres vivos son distintos. No aceptan pasivamente las leyes de la entropía, sino todo lo contrario, pues actúan como chiquillos testarudos e impugnan sus exigencias en un intento de negociar una alternativa. No se limitan a fijar estructuras, como los protones y los electrones. No viven a expensas de un depósito de energía, como las estrellas, que se devoran a sí mismas al consumir la provisión de protones que almacenaron al nacer y que se desintegran en cuanto vacían la despensa. Los organismos vivos buscan constantemente en su entorno nuevos flujos de energía, ya que aspiran a mantenerse en un estado que, siendo complejo, es también inestable. Esto no cuadra con el comportamiento de una piedra, pero sí con el de un pájaro que aletea para llegar a donde quiere. Los organismos vivos se sostienen en el aire (termodinámicamente hablando) mediante la ingesta de aquellas cantidades de energía libre que les permiten movilizar los intrincados procesos químicos que reorganizan sus átomos y sus moléculas y los ajustan a los patrones que necesitan para permanecer con vida. Y cuando no consiguen satisfacer la fiscalidad energética de la entropía, se estrellan.

¡Hablando de energía y de vida! En los años que pasé en Australia recuerdo haber visto a mis hijos transformar la energía de los sándwiches de Vegemite* en los arrebatados ímpetus que les hacían correr y chillar como locos por el jardín. Podemos llegar a medir incluso la velocidad a la que fluye la energía libre (obtenida tal vez de una tostada de Vegemite) al ser transformada en el gasto energético de una conversación o una carrera y terminar convirtiéndose en calor (de acuerdo con un proceso en el que la entropía tiene un crecimiento constante). Un ser humano corriente ingiere unas 2.500 calorías diarias, lo que representa aproximadamente 10,5 millones de julios (el julio es una unidad de medida del trabajo o la energía: una caloría equivale más o menos a 4.184 julios). Si dividimos esta cifra por los 86.400 segundos que tiene el día, comprobamos que un individuo consume cerca de 120 julios por segundo. Esa es la «potencia nominal» de un ser humano: 120 vatios, apenas un poco más que la que se asigna a la mayoría de las bombillas incandescentes.[1]

La vida, con su incansable esfuerzo por rechazar la entropía, es la imagen misma de un nuevo tipo de complejidad, una complejidad que alcanza con ella unos niveles nunca antes vistos. Los teóricos de la complejidad describen a veces las entidades de este umbral como sistemas adaptativos complejos. A diferencia de los sistemas físicos que hemos visto hasta ahora, cuyos componentes siguen un comportamiento que por regla general puede predecirse a partir de las leyes fundamentales del universo, los elementos que integran los sistemas adaptativos complejos parecen responder a una voluntad propia. Dan la impresión de seguir un conjunto de leyes adicionales mucho más difíciles de detectar. De hecho, los sistemas adaptativos complejos, como las bacterias, los perros o las compañías multinacionales, actúan como si cada una de las unidades que las forman fuese un agente dotado de una voluntad individual, lo que implica que todos ellos han de adaptarse constantemente a la

conducta de los otros muchos componentes del sistema. Y eso determina que su proceder pueda seguir cursos muy complejos e impredecibles.[2]

Al emplear la palabra «agente» he introducido una idea nueva que tendrá una importancia creciente: me refiero a la noción de información. Si los agentes reaccionan a la conducta de otros agentes, lo que en realidad sucede es que están reaccionando a la información que les indica lo que está sucediendo en su entorno, incluida la relativa a lo que están haciendo en cada momento los demás agentes. Si para comprender mejor nuestra historia moderna de los orígenes dotamos imaginariamente a la información de las facultades propias de un personaje de carne y hueso, estaríamos ante un individuo dedicado a operar de forma encubierta o bajo un disfraz, es decir, como alguien capaz de manipular los acontecimientos y al mismo tiempo mantenerse lejos de los focos que iluminan el escenario de la acción. La energía provoca cambios, así que, por regla general, podemos verla en acción. La información, por el contrario, orienta ese cambio, y a menudo lo dirige en la sombra. El físico y profesor de ingeniería mecánica Seth Lloyd explica del siguiente modo esta contraposición: «Para hacer cualquier cosa se precisa energía. Para especificar qué debe hacerse se requiere información».[3]

En su forma más general, la información consta de una serie de normas susceptibles de incidir en los resultados mediante la introducción de limitaciones en las posibilidades. Una de las más célebres definiciones del concepto de «información» la describe como «una diferencia que marca la diferencia».[4] Las reglas de la información determinan cuáles son los cambios posibles en un tiempo y un espacio concretos, teniendo en cuenta todas las opciones concebibles (y eso sin duda marca la diferencia). La información comienza con las leyes de la física, que constituyen el sistema operativo fundamental de nuestro universo. Tales leyes encarrilan el cambio por cauces específicos, como los que permitieron que la acción de la gravedad diera lugar al surgimiento

de las primeras estrellas. En este sentido tan general, la información pone límites a lo posible, lo que significa que también reduce la aleatoriedad de los sucesos. Esto es lo que hace que todo aumento de información parezca conllevar una disminución de la entropía, dado que sus efectos restringen el potencial desorden que esta tanto aprecia. Y si alguna información hay de carácter universal es justamente esa: la de las reglas que se hallan inherentemente inscritas en la más insignificante cantidad de materia y energía. La gravedad no necesita que nadie le diga qué debe hacer. Se limita a hacer su trabajo.

No obstante, en la forma coloquial en que solemos utilizarlo, el término «información» denota algo más que un puñado de normas. Apunta al conjunto de reglas que una persona, un agente o una entidad —de hecho, cualquier sistema adaptativo complejo— es capaz de leer o descifrar. Este tipo de información surge debido a que hay un gran número de normas relevantes que no son universales. Como puede advertirse, por ejemplo, en el caso de las leyes de las sociedades humanas, esas normativas varían en función del lugar y la época. A medida que el universo fue evolucionando empezaron a aparecer nuevos entornos, como los del espacio profundo, las nubes de polvo galáctico o la superficie de los planetas telúricos. Estos entornos tenían reglas propias que no eran universales. Y a su vez, esas reglas locales debían ser leídas, decodificadas o estudiadas, tal como ocurre, por ejemplo, si uno se dispone a viajar a Mongolia, pues en tal caso le interesará saber por qué lado de la carretera se conduce allí (el derecho, dicho sea de paso).

Los sistemas adaptativos complejos solo pueden sobrevivir en entornos muy concretos, así que han de ser capaces de interpretar o descifrar tanto la información local como las leyes universales. Y esto también es una novedad. Todas las formas de vida necesitan mecanismos destinados a la interpretación de la información local (como la presencia de distintas sustancias químicas, la valoración de la temperatura del medio o la percepción de los niveles de acidez de

su hábitat inmediato) a fin de poder responder apropiadamente a la situación del momento («¿Qué debo hacer con ese objeto: abrazarlo, comérmelo o huir de él?»). En palabras del filósofo Daniel Dennett: «Los animales no son solo herbívoros o carnívoros. Son... *informávoros*».[5] De hecho, los organismos vivos son invariablemente *informávoros*, ya que todos ellos consumen información. Y los mecanismos que utilizan para interpretar y responder a la información local —ya se trate de ojos y tentáculos o de músculos y circunvoluciones cerebrales— tienen mucho que ver con la complejidad que presentan.

Los entornos locales son inestables, así que los organismos vivos deben comprobar constantemente las condiciones del medio, tanto interno como externo, para poder detectar cualquier cambio significativo. Y cuanto más aumenta la complejidad de los seres vivos, tanto más se incrementa su necesidad de información, dado que las estructuras más complejas tienen más elementos móviles y más puntos de unión entre sus diferentes partes. La bacteria conocida como *Escherichia coli* (*E. coli*), que probablemente florece en el intestino de quien lee estas líneas, dedica aproximadamente el 5 % de sus recursos moleculares a garantizar su movilidad y su percepción, pero en el cuerpo humano, *la mayor parte* de los órganos se consagran, directa o indirectamente, a la percepción y el movimiento, desde el cerebro a los ojos, pasando por los tejidos nerviosos y los paquetes musculares.[6] La ciencia moderna es el último eslabón de una inmensa cadena de sistemas de recopilación y análisis de la información, una cadena que se inició con los sencillísimos sensores de los primeros organismos unicelulares.

Por supuesto, a la entropía le brillan los ojos ante semejante situación. Si el aumento de la complejidad lleva aparejado un desarrollo de la información, parece claro que si incrementamos simultáneamente ambas características estaremos *reduciendo* la entropía y su inseparable cortejo de incertidumbre o desorden. Y la entropía lo nota. Se frota las manos ante la sola idea de las tasas y tributos energéticos que obtendrá con la expansión de los niveles de

la complejidad y la información.[7] De hecho, hay quien argumenta que a la entropía le encanta la perspectiva de la vida (y que podría estimular su aparición en muchas regiones del universo) porque los organismos vivos son mucho más eficientes en la degradación de la energía libre que los inanimados.

Uno de los problemas más difíciles que afronta la ciencia moderna es explicar el origen de la vida en la Tierra e intentar imaginar si algo similar puede haber surgido en algún otro punto de nuestro universo. De momento solo sabemos de la existencia de un planeta habitado por seres vivos. Los astrobiólogos intentan averiguar mediante el programa Search for Extraterrestrial Intelligence (búsqueda de inteligencia extraterrestre o SETI, por sus siglas en inglés) si hay o no hay vida lejos de la Tierra. Este programa se inició en 1960, pero hasta la fecha no ha encontrado nada. Por ahora nos vemos obligados a ceñirnos exclusivamente al estudio del origen de la vida en nuestro planeta. Lo que resulta sumamente difícil, ya que implica tratar de determinar qué pudo suceder en la Tierra hace casi cuatro mil millones de años, cuando las condiciones que reinaban en el globo eran muy distintas.

La definición de la vida

El hecho de no contar más que con una única muestra complica incluso la averiguación de qué es la vida. ¿Qué distingue a los seres animados de los inanimados? Establecer la esencia de la vida es tan arduo como determinar qué es la complejidad o la información, y además parece existir una oscura zona fronteriza entre lo vivo y lo inerte.

La mayoría de las definiciones actuales de la vida en la Tierra incluyen las cinco características siguientes:

1. Los organismos vivos constan de células envueltas en membranas semipermeables.

2. Tienen metabolismo, es decir, un conjunto de mecanismos que les permiten aprovechar y utilizar los flujos de energía libre del medio para reorganizar los átomos y las moléculas y formar así las estructuras dinámicas y complejas que precisan para sobrevivir.
3. Pueden adaptarse a los cambios de su entorno mediante la homeostasis, un sistema que emplea la información relativa a las condiciones de los medios interno y externo en que se desenvuelve el ser vivo para poner en marcha un conjunto de mecanismos con los que este reacciona a la situación creada.
4. Son capaces de reproducirse valiéndose de información para crear copias casi exactas de sí mismos.
5. No obstante, esas copias difieren en toda una serie de detalles minúsculos de sus genitores, así que, con el paso de un gran número de generaciones, las características de los seres vivos van cambiando progresivamente, a medida que evolucionan y se adaptan a la mudable naturaleza de su entorno.

Fijémonos ahora, uno por uno, en los puntos anteriores.

Todos los seres vivos que pueblan la Tierra están formados por células. Cada una de ellas contiene millones de moléculas complejas capaces de reaccionar un gran número de veces entre sí, y en un solo segundo, mientras evolucionan en el caldo acuoso, salado y repleto de sustancias químicas y proteínas que compone el viscoso medio que conocemos como «citoplasma». El citoplasma está rodeado de una especie de valla química, la membrana celular, que controla lo que entra y sale de la célula. A semejanza de las murallas de las ciudades medievales, esta membrana dispone de puertas protegidas por guardianes que deciden qué viajeros moleculares pueden ingresar en la plaza y en qué momento. Lo cierto es que las células se parecen mucho a las ciudades. En un libro dedicado al estudio de las células, Peter Hoffmann explica que en cada una de ellas:

> Hay una biblioteca (el núcleo, en cuyo interior se aloja el material genético), varias centrales eléctricas (las mitocondrias), carreteras (los microtúbulos y los filamentos de actina), vehículos pesados (la kinesina y la dineina), sistemas de eliminación de residuos (los lisosomas), muros de ronda (las membranas), un servicio postal (el aparato de Golgi) y otras muchas estructuras destinadas a desempeñar diferentes funciones vitales. Y las encargadas de llevar a cabo todas estas operaciones son siempre las máquinas moleculares.[8]

Todos los seres vivos dependen de la minuciosa gestión de los flujos de energía libre. Si ese flujo se detiene, los organismos mueren, como le sucedería a una ciudad asediada y obligada a la rendición por hambre. Ahora bien, los flujos demasiado violentos tampoco son compatibles con la vida; es lo mismo que le sucedería a una ciudad sometida a un bombardeo aéreo, por abusar de la metáfora. Por consiguiente, los flujos de energía deben manejarse con la mayor de las delicadezas. Por regla general, las células ingieren y utilizan la energía en dosis ínfimas, electrón por electrón o protón por protón. Pese a ser lo suficientemente pequeños para no causar alteraciones, esos flujos de energía libre tienen la intensidad necesaria para proporcionar las energías de activación precisas para poner en movimiento un montón de procesos químicos fascinantes. Desde el punto de vista etimológico, la palabra «metabolismo» procede de un término griego que significa «cambio». Esto nos recuerda que las células nunca permanecen inactivas. Al igual que los pájaros en vuelo, utilizan los flujos de energía para conservar el mayor grado de adaptación posible al medio, en constante cambio, en que se hallan.

Los organismos vivos deben estar siempre alerta a las variaciones en su entorno para ajustar su funcionamiento a esas oscilaciones. Esta incesante acomodación se conoce con el nombre de homeostasis preservadora. Y para mantener el equilibrio, sea del tipo que sea, en un entorno definido por su perpetua mutación, las células deben poder acceder, asimilar y decodificar la información relativa a su entorno, tanto interno como externo, y de forma

ininterrumpida, pues en todo momento han de estar en condiciones de decidir qué respuesta les conviene más para después llevarla a la práctica. La voz «homeostasis» significa «quedarse quieto» o «mantener el mismo estado», que es justamente lo contrario del «cambio». No obstante, este «estatismo» adquiere pleno sentido si pensamos que apunta a la persistencia de lo vivo en el inextinguible huracán molecular que agita el medio de la célula.

Por impresionantes que resulten estas facultades de lo vivo, convendremos en que resultarían de muy escaso interés si los seres animados surgieran solo para después evaporarse como la espuma de las olas. Y tal vez eso haya sido justamente lo sucedido en algunos de los planetas que orbitan en torno a determinadas estrellas, y quizá también haya ocurrido incluso en los comienzos de la historia de la Tierra. Aun así, en el globo que habitamos actualmente, los organismos vivos no se limitan a resistir el ciclón del cambio y la entropía, ya que también hacen copias de sí mismos, de manera que cuando unas células mueren (y al final todas están abocadas a desaparecer), otras pueden ocupar su lugar. La reproducción es la capacidad de realizar réplicas viables de las células. Por otro lado, el hecho de que se produzca esa reproducción significa que la «plantilla» que contiene la información necesaria para fabricar un organismo (es decir, su genoma, por emplear la terminología contemporánea) puede sobrevivir aun después del fallecimiento de los individuos concretos. A semejanza de un manual de instrucciones, el genoma no contiene solo la información relativa a las proteínas necesarias para producir una copia del genitor, sino también unas cuantas reglas básicas para el ensamblaje del conjunto. En la actualidad, la mayor parte de esa información se almacena en moléculas de ADN, pero es probable que en los primeros tiempos de la historia de la vida en la Tierra se guardara en el ARN, un primo molecular del ADN que todavía se encarga de los trabajos pesados que hay que realizar en el interior de las células.

Pese a que las plantillas sean más o menos inmortales, lo cierto es que el proceso de copiado no es perfecto. Esto es bueno, porque significa que las plantillas pueden ir cambiando poco a poco como consecuencia de los minúsculos errores de copiado que van produciéndose, que es la clave de la adaptación y la evolución. Esas pequeñísimas transformaciones genéticas son las que otorgan a la vida su notable resiliencia, pues permiten que las especies se adapten al entorno en el que viven mediante la creación de plantillas ligeramente distintas. Y a medida que cambia el medio se modifican también las reglas que determinan qué plantillas sobrevivirán y cuáles acabarán por desaparecer.

Este es el mecanismo que Charles Darwin bautizó como «selección natural» y es una de las ideas fundamentales de la biología moderna, dado que es un motor de extraordinaria potencia que sirve para impulsar el incremento de la complejidad. La selección natural filtra algunas de las posibilidades genéticas y permite la expresión solo de aquellas compatibles con las normas locales. Por consiguiente, la selección natural actúa a la manera de un trinquete o de uno de esos mecanismos que fuerzan en una única dirección la evolución de los procesos, impidiendo su vuelta atrás, tal como vimos que sucedía con las leyes fundamentales de la física, puesto que fija las pautas de carácter no aleatorio. Sin embargo, en el reino de la biología, el factor que determina la supervivencia no son las leyes fundamentales de la física, sino las normas locales que establecen los entornos específicos en los que se mueven los seres vivos. Y las normas biológicas son mucho más quisquillosas. No puede esperarse que una jirafa sobreviva bajo el agua.

Como los mecanismos que generaron las primeras estructuras del universo, la selección natural establece un puente de unión entre el azar y la necesidad. La variación ofrece una amplia gama de posibilidades. La selección natural emplea las reglas locales para elegir las que son capaces de funcionar en unas condiciones específicas dadas. Así lo explica Darwin en *El origen de las especies*:

> A la vista de que sin duda se han producido variaciones útiles al hombre, ¿puede parecer improbable que, del mismo modo, para cada ser, en la grande y compleja batalla de la vida, tengan que producirse otras variaciones útiles en el transcurso de muchas generaciones sucesivas? Si esto ocurre, ¿podemos dudar —recordando que nacen muchos más individuos de los que acaso puedan sobrevivir— que los que cuenten con alguna ventaja sobre otros, por ligera que sea, tendrán más probabilidades de sobrevivir y procrear su especie? Por el contrario, podemos estar seguros de que toda variación en el menor grado perjudicial tiene que ser rigurosamente destruida. A esta conservación de las diferencias y variaciones individualmente favorables y la destrucción de las que son perjudiciales la he llamado yo selección natural.[9]

Una vez asociada con la comprensión moderna de la genética y los mecanismos de la herencia, la idea de Darwin no solo explica la creatividad de la vida, sino también la aptitud que tiene para explorar diferentes posibilidades a lo largo de un gran número de generaciones, su habilidad para explotar nuevos flujos de energía y su capacidad de construir nuevos tipos de estructuras. También aclara cómo es posible que surjan estructuras de pasmosa complejidad en el reino de la biología mediante la simple puesta en acción de un conjunto de procesos algorítmicos de carácter repetitivo que posteriormente son sometidos a la criba de la selección natural, que, paso a paso y generación tras generación, elimina un número casi infinito de variaciones en el transcurso de miles de millones de años.

La idea de la selección natural causó conmoción entre los contemporáneos de Darwin porque parecía eliminar la necesidad de un Dios creador.[10] Y esa fe era fundamental para mantener la historia de los orígenes elaborada por el cristianismo (un relato que en la Inglaterra victoriana contaba con la aceptación de mayor parte de la sociedad). Hasta el propio Darwin se sintió preocupado, y su esposa, Emma, se sintió angustiada porque temía que en la otra vida Charles y ella acabaran en sitios distintos. Aun así, el mecanismo que Darwin describió constituye uno de los pilares esenciales de la historia de la vida. Si los pinzones se reproducen independientemente de sus semejantes, como ocurre en una de las

islas Galápagos que Darwin visitó en su juventud, la selección natural se pone de manifiesto, ya que, al cabo del tiempo, y dado que los árboles de esa isla producen un tipo de nuez de cáscara extremadamente dura, los pinzones cuyo pico se revele más eficaz para partir esa correosa cápsula sobrevivirán mejor y tendrán más descendencia que sus congéneres menos dotados. Si aguardamos unas cuantas generaciones, descubriremos que todos los pinzones de esa isla tienen ese particular tipo de pico. Y con el paso de los años, a medida que los individuos sean seleccionados por la «naturaleza» (en realidad, por las reglas del entorno local), surgirá finalmente una nueva especie. Como acertó a mostrar Darwin, este es el mecanismo fundamental de la evolución biológica. Y en eso consiste justamente el trinquete que orienta en una sola dirección la complejidad darwiniana, dado que así es como se las ingenia la vida para fabricar, paso a paso, objetos cada vez más complejos.

Las condiciones ricitos de oro que favorecieron la aparición de la vida

¿Cómo fueron los primeros balbuceos de la vida al iniciar esta su andadura en alguno de los fecundos y variados entornos Ricitos de Oro del joven planeta Tierra?[11]

Lo que Darwin no sabía era que en un mundo carente de vida también pueden operar, si bien de forma burda, algunos mecanismos parecidos a los de la selección natural, ya que en ellos los cambios aleatorios también pasan por un cedazo. En los entornos provistos de una compleja mezcla de sustancias químicas y de grandes cantidades de energía libre, pueden aparecer moléculas capaces de estimular la formación de otras distintas, y esto, en último término, acaba provocando el surgimiento de las moléculas dotadas de la facultad de poner en marcha el proceso de la vida. Se trata de un ciclo autocatalítico, es decir, de una reacción cuyos componentes posibilitan, o catalizan, la producción de otros elementos del ciclo, incluyendo sus ingredientes originales, con lo

que el ciclo puede repetirse a sí mismo. Si uno de esos ciclos echa a andar, empezará a generar sus componentes en cantidades cada vez mayores, dado que extrae un creciente volumen de energía y nutrientes hasta que comienza a debilitar las condiciones que requieren otros ciclos de menor éxito para desarrollarse. El ciclo puede así llegar incluso a modificarse ligeramente a sí mismo si aparecen nuevos tipos de sustancias con las que sostenerse. De este modo, el proceso empieza a parecerse a una lucha por la supervivencia de la reacción química más eficaz, lo que significa que nos encontramos ya frente a algo relativamente similar a lo vivo, es decir, ante una realidad capaz de perseverar y reproducirse mediante la extracción de energía del medio. Según explica Daniel Dennett en una de sus obras, «antes de asistir a la aparición de agentes susceptibles de reproducirse de forma competente debemos contar con la presencia de agentes capaces de persistir con idéntica aptitud, es decir, hemos de disponer de estructuras dotadas de una estabilidad y una permanencia en el medio lo suficientemente amplias como para aprovechar el surgimiento de versiones actualizadas de sí mismas».[12] Esta idea de la evolución química nos ayudará a explicar, al menos a grandes rasgos, cómo pudieron darse las condiciones o requisitos previos para que brotara la vida en la fase juvenil del planeta Tierra.

La evolución química solo puede realizarse en un entorno capaz de permitir una fértil experimentación química. Y lo cierto es que esos entornos son muy raros. Así pues, ¿cuáles son las condiciones Ricitos de Oro para esos ensayos químicos? ¿Y por qué la joven Tierra dio muestras de contar con tan gran número de ellos?

En primer lugar, nuestro sistema solar se encuentra en una posición idónea dentro de la Vía Láctea. Las estrellas de los barrios periféricos de la galaxia no disponen más que de unas nubes de elementos químicos muy empobrecidas y poco densas, de modo que trabajan con una materia prima muy poco prometedora. Por otra parte, los astros situados demasiado cerca de la convulsa zona centro de la galaxia sufren la embestida de las ondas de choque que

generan los violentos espasmos de los agujeros negros anclados en su eje. Nuestro sistema solar está justo donde debería estar. La órbita que describe lo mantiene a una distancia del corazón galáctico aproximadamente equivalente a las dos terceras partes de su radio, en plena «zona habitable».

En segundo lugar, las reacciones químicas solo se desarrollan adecuadamente a temperaturas bajas. El universo primitivo estaba demasiado caliente para que los átomos pudieran combinarse y dar lugar a la formación de moléculas. Y lo mismo ocurre en el interior de las estrellas. La posibilidad de asistir a procesos químicos fructíferos se da solo en una estrecha banda de temperaturas moderadamente suaves, y esa horquilla térmica se encuentra en las zonas habitables, situadas a su vez en las inmediaciones de las estrellas, siempre y cuando la proximidad no sea excesiva. Nuestro planeta orbita poco más o menos en la franja central de la zona habitable del sol. Venus y Marte giran, respectivamente, en los límites interno y externo de esa zona habitable. No obstante, en los últimos tiempos estamos constatando que algunos de los satélites más alejados del sol, como Encélado (una de las lunas de Saturno), también podrían disponer de una caldera interior y de un conjunto de procesos químicos compatibles con la vida. En 2017, los científicos descubrieron que los océanos de Encélado producen hidrógeno, es decir, el mismo gas que proporcionó nutrientes a algunos de los primeros organismos del planeta Tierra.[13]

La tercera condición Ricitos de Oro para la concreción de una actividad química rica y variada es la presencia de líquidos. En los gases, los átomos corretean de un lado a otro como mozalbetes hiperactivos, así que es muy difícil que se detengan lo suficiente como para combinarse con otros átomos. En los sólidos surge el problema contrario, pues los átomos están fijos en una posición. Sin embargo, los líquidos son como pistas de baile, y el agua en ese estado, con sus insinuantes enlaces de hidrógeno, es la mejor de todas. Los átomos pueden ligar, enlazarse en un vals, o atacar un tango, y a los electrones no les cuesta demasiado cambiar de pareja

si encuentran a alguien más atractivo. La presencia de líquidos depende del medio químico, de la temperatura y de la presión. Hay una estrecha franja de temperaturas en la que el agua se presenta en forma líquida (la mayor parte de la que existe en el universo es simplemente hielo). No obstante, a estas mismas temperaturas también pueden encontrarse gases y sólidos, lo que abre la puerta a un gran número de interesantes posibilidades químicas. Por consiguiente, lo que cabe esperar es que la química más sugerente sea la que se da en los planetas que en su superficie tengan una temperatura media situada aproximadamente entre cero y cien grados Celsius, es decir, entre los puntos de congelación y ebullición del agua. Esto es muy raro, pero resulta que nuestro planeta se halla a una distancia del sol que es precisamente la que se requiere para disponer de agua en estado líquido.

La cuarta condición Ricitos de Oro que permite una actividad química productiva es la existencia de una amplia variedad de elementos. No sirve de nada disponer de las temperaturas idóneas si los únicos átomos con los que puede trabajarse son de hidrógeno y helio. Y en la actualidad, estos dos componentes siguen constituyendo el 98 % de toda la materia atómica, incluso en las regiones químicamente fértiles de las franjas medias de las galaxias. Lo que necesitan los procesos químicos es la presencia de esos excepcionales entornos en los que resulta más habitual hallar los demás elementos de la tabla periódica. En nuestro sistema solar, esa diversidad solo se advierte en los planetas telúricos próximos al sol, dado que, en su fase juvenil, este provocó la evaporación de buena parte del hidrógeno y el helio, alejándolos de las órbitas interiores del sistema solar (lo que dejó tras de sí un destilado con elevadas concentraciones de todos los elementos de la tabla periódica).

En cuanto la Tierra recién formada se solidificó, su heterogéneo caldo químico comenzó a generar grandes masas rocosas, es decir, cuerpos sólidos constituidos por gran cantidad de moléculas aglutinadas, todas ellas simples y diferentes. También entonces

aparecieron los primeros minerales de nuestro planeta, probablemente de estructura cristalina, como el grafito o los diamantes.[14]

Ese medio químicamente fecundo hizo posible la formación, más o menos espontánea, de muchas de las moléculas simples que permiten el surgimiento de la vida. Se trataba de moléculas muy pequeñas, integradas por menos de cien átomos, y entre ellas se encontraban los aminoácidos que estructuran todas las proteínas, los nucleótidos que forman la totalidad del material genético, los carbohidratos o azúcares que suelen actuar a modo de baterías, ya que en ellos se almacena la energía, y los grasientos fosfolípidos que constituyen las membranas celulares. En nuestros días, esas moléculas ya no brotan de manera espontánea, pues el oxígeno las desintegraría. Sin embargo, en la atmósfera de la Tierra primitiva apenas había oxígeno libre en la atmósfera, así que todas esas moléculas simples podían formarse con tal de recibir unas cuantas inyecciones de energía activadora.

En 1952, en un esfuerzo destinado a demostrar este extremo, un joven licenciado en ciencias químicas de la Universidad de Chicago llamado Stanley Miller creó en el laboratorio un modelo de la atmósfera reinante en los primeros tiempos de la Tierra, colocando agua, amoniaco, metano e hidrógeno en un sistema cerrado de tubos y matraces. Calentó la mezcla y la sometió una serie de descargas eléctricas (un equivalente de laboratorio de los volcanes y las tormentas secas que sacudían aquella Tierra adolescente) para dotar a la pócima de un mínimo de energía de activación. A los pocos días, Miller descubrió que se había formado un fango rosado constituido por aminoácidos. Hoy sabemos que en esos entornos también pueden surgir otras moléculas orgánicas simples, entre las que se cuentan los fosfolípidos. En la actualidad, los resultados obtenidos por Miller, que siguen siendo básicos para la comprensión de la química de la vida, continúan vigentes, aunque también

sabemos que los elementos predominantes en la atmósfera primitiva de nuestro planeta no eran el metano y el hidrógeno, sino el vapor de agua, el dióxido de carbono y el nitrógeno.

Desde la época de Miller hemos comprobado que muchas de esas moléculas pueden constituirse incluso en un entorno como el del espacio interestelar, pese a que desde el punto de vista químico este sea mucho menos propicio a ese surgimiento. Esto significa que un gran número de moléculas orgánicas simples pudieron desembarcar en la Tierra, ya formadas, tras viajar en el interior de algunos cometas o asteroides. El meteorito de Murchison, por ejemplo, que cayó a la Tierra en las inmediaciones de la localidad australiana de Murchison en el año 1969, no solo contenía aminoácidos, sino también varias de las bases químicas que pueden encontrarse en el ADN. En la primitiva historia de la Tierra, la irrupción de ese tipo de meteoritos era mucho más frecuente que en la actualidad, lo que sugiere que en las fases iniciales del planeta hubo una siembra de materias primas, y precisamente de las más necesarias para la vida, sin olvidar que, además, la Tierra era capaz de fabricar más por su propia cuenta.

No obstante, la mayoría de las moléculas que se encuentran en el interior de las células, como las proteínas o los ácidos nucleicos, son mucho más complejas que las que estamos analizando aquí, cuya naturaleza es notablemente más simple. Las moléculas complejas están constituidas por polímeros, es decir, por largas y delicadas cadenas de moléculas, y la formación de polímeros no es tan sencilla. Es preciso disponer tanto de una cantidad de energía de activación muy concreta como de un conjunto de entornos capaces de animar a las moléculas a ensartarse unas con otras, y de hacerlo además de una manera muy particular. Uno de los entornos que ya existían en la Tierra primitiva y que pudieron proporcionar las condiciones ideales para enhebrar polímeros es el que hoy puede hallarse todavía en las fumarolas hidrotermales del suelo oceánico, donde el ardiente magma de las entrañas de la Tierra rezuma por una serie de respiraderos abiertos en el fondo del mar. Estos

entornos estaban protegidos de la radiación solar y de los violentos bombardeos siderales de la superficie. Además, contenían distintos elementos químicos, disponían de una inmensa cantidad de agua y contaban con marcados gradientes de temperatura y acidez (generados por los ardientes magmas, de gran riqueza química, que se filtraban a través de las grietas y entraban en contacto con las frías profundidades del océano). Las fumarolas alcalinas, descubiertas en fechas recientes (en el año 2000), constituyen entornos particularmente prometedores, y las porosas rocas que se forman en esos respiraderos ofrecen minúsculos y resguardados refugios a la experimentación química, un poco al modo de las pipetas y balones de destilación de Miller. En esas fuentes hidrotermales se han hallado incluso superficies similares a las arcillosas que poseen estructuras moleculares de forma regular capaces de producir plantillas físicas o eléctricas en las que los átomos pueden competir entre sí hasta constituir patrones uniformes que les permiten conservar su estabilidad y dar lugar a la aparición de cadenas parecidas a las de los polímeros.

De los entornos químicamente fértiles a la vida: LUCA, el último antepasado común universal

La vida apareció en una fase muy temprana de la historia del planeta Tierra, lo que podría sugerir que la creación de formas de vida simples quizá no sea un proceso tan complicado cuando se dan las adecuadas condiciones Ricitos de Oro. No obstante, el momento exacto en que surgió resulta mucho más difícil de precisar: no solo debido a que los primeros organismos vivieron hace más de tres mil millones de años, sino también a que eran de tamaño microscópico y a que las rocas en las que acabaron enterrados se han erosionado. En la actualidad, la mejor constatación directa de las formas de vida más primitivas de la Tierra es la que nos ofrecen los fósiles microscópicos hallados en 2012 en Australia Occidental, en la aislada

región de Pilbara. Se cree que pertenecieron a un grupo de bacterias que se desarrollaron en la zona hace unos 3.400 millones de años.[15] En septiembre de 2016, un artículo publicado en la revista *Nature* divulgó que en Groenlandia se habían encontrado otros fósiles de 3.700 millones de años de antigüedad, presentes en unas formaciones de aspecto pétreo llamadas estromatolitos.[16] Si estas estructuras microbianas son efectivamente lo que muchos científicos creen que son, la vida tuvo necesariamente que empezar a evolucionar muchos millones de años antes de lo que se pensaba, dado que tuvo que aparecer poco después del bombardeo intenso tardío, hace unos 3.800 millones de años. A principios de 2017, tomando como base los restos fosilizados descubiertos al norte de Quebec, los investigadores comenzaron a sostener que la vida pudo haber surgido hace nada menos que 4.200 millones de años. Habrá que esperar un tiempo para poder comprobar si esas afirmaciones se sostienen o no.[17]

Los biólogos todavía no han logrado ofrecer una explicación completa de las vías que siguió la evolución de los primeros seres vivos. Aun así, comprenden muchos de los pasos que exigió el proceso.

Aun cuando no saben con exactitud qué aspecto tenía, los paleobiólogos dan al primer organismo vivo el nombre de Luca (o mejor LUCA, dado que la denominación responde a las siglas inglesas de *last universal common ancestor*, es decir, «último antepasado común universal»). Desde luego, Luca vivió antes que cualquiera de las formas de vida descubiertas hasta la fecha, y muchas de sus características eran idénticas a las que muestran los organismos modernos que llamamos procariotas: seres unicelulares cuyo material genético no se halla protegido en el interior de un núcleo. En la actualidad, los procariotas constituyen tres vastos taxones de organismos: Bacteria y Arquea (el tercer dominio, del que forma parte nuestra propia especie, es el de Eucaria).

Nunca lograremos hallar fósiles de Luca porque en realidad es una criatura hipotética, una especie de fotomontaje del primer ser vivo, no demasiado distinto al retrato robot que elabora la policía para tratar de hacerse una idea del aspecto de un delincuente en busca y captura. Con todo, esa imagen esquemática puede ayudarnos a comprender cómo se inició la vida.

Tal vez Luca estuviera en un estado parecido al animado pero no del todo, llevando una suerte de existencia zombi a medio camino entre lo vivo y lo inerte. No se trata de una noción tan esquiva como puede parecer a primera vista. Los virus no están plenamente vivos, pues no cumplen todas las condiciones de nuestra definición de lo viviente. Carecen de metabolismo y sus membranas son muy frágiles, de modo que ni siquiera podemos afirmar con rotundidad que sean auténticas células. Son poco más que una bolsa de material genético que se fija a otros organismos más complejos. Penetran en las células, secuestran los mecanismos metabólicos de las mismas y los utilizan para replicarse. Cuando contraemos la gripe, lo que nos ocurre es que los virus absorben energía de nuestras rutas metabólicas. Ahora bien, si no encuentran ninguna célula que raptar, los virus se desactivan y quedan al acecho, en una especie de animación suspendida. Hay también algunas células capaces de vivir en el interior de las rocas y que operan con metabolismos sumamente lentos. Sobreviven con cantidades diminutas de agua y nutrientes. Algunas de ellas están dotadas de la facultad de suspender por completo la totalidad de sus funciones durante largos períodos de tiempo, como Hotblack Desiato, el guitarrista de rock de la novela de Douglas Adams *El restaurante del fin del mundo*, que se pasa todo un año muerto con fines fiscales. No obstante, los impuestos que estos organismos eluden, son los que la entropía exige a cambio de permitir temporalmente la complejidad. Es muy posible que Luca viviera en un limbo similar.

Gracias a la identificación de varios centenares de genes, de origen probablemente muy reciente y presentes en los más modernos procariotas, se han logrado elaborar unas cuantas

estructuras que reproducen de manera esquemática la que pudo haber tenido Luca. Estos esbozos nos indican en cierto modo el tipo de entorno en el que debió de desenvolverse, dado que señalan la clase proteínas que fabricaba para sobrevivir.[18]

Este Luca compuesto artificialmente (o mejor dicho, esta familia de Lucas, puesto que en realidad estamos hablando de miles de millones de organismos primitivos) podía adaptarse a los cambios registrados en su medio. Tenía un genoma, así que podía reproducirse. Además, también consiguió evolucionar. Es muy probable que Luca careciera tanto de membrana como de metabolismo. Es posible que sus paredes celulares estuviesen formadas por polvo de roca volcánica, de naturaleza porosa, y que su metabolismo dependiera de un conjunto de flujos de energía geoquímica sobre los que apenas podía ejercer el más mínimo control. Las proteínas que fabricaba sugieren que Luca vivía en los límites de las fumarolas alcalinas oceánicas, seguramente en el interior de los minúsculos orificios de las piedras formadas al solidificarse las coladas de lava, y que obtuviera la energía que precisaba de los gradientes de energía de las inmediaciones, sobre todo del calor y de la acidez, añadidos a los flujos de protones y electrones que se hallaban igualmente presentes en ese medio. Lo más probable es que las entrañas químicas de Luca flotaran en los cálidos líquidos procedentes del interior de la Tierra, de propiedades alcalinas (derivadas a su vez de su exceso de electrones). En las inmediaciones de los poros volcánicos en los que Luca tenía su hogar circulaba el agua del fondo marino, más fría y ácida —es decir, marcada por un excedente de protones—. Tal como ocurre con una pila cargada, el minúsculo gradiente de energía que existía entre el interior de Luca y el mundo exterior proporcionaba la energía libre necesaria para impulsar su metabolismo, ingerir los nutrientes de fuera y expulsar los materiales de desecho.

Así explica Nick Lane, uno de los precursores de los estudios sobre las primitivas formas de vida, las características de Luca:

> No era [Luca] una célula de vida autónoma, sino un pétreo laberinto de células minerales dotadas de un revestimiento catalítico que hacía las veces de pared celular y que estaba compuesto de hierro, azufre y níquel. Obtenía su energía de los gradientes naturales de protones. La primera forma de vida era una roca porosa capaz de generar energía y moléculas complejas, hasta llegar incluso a la formación de proteínas y del mismísimo ADN.[19]

Pese a resultar simple en comparación con los organismos modernos, Luca ya contaba con un montón de estupendos chismes bioquímicos, incluidas muchas de las fórmulas que permiten el funcionamiento de la maquinaria metabólica y reproductiva de las células actuales. Es probable que tuviera un genoma basado en el ARN, así que podía reproducirse con una fidelidad y una precisión muy superiores a las de los simples caldos químicos, lo que sugiere que su evolución quizá se acelerara notablemente. También utilizaba los flujos de energía que explotaba para fabricar ATP (adenosín trifosfato), la misma molécula que se encarga de transportar la energía en el interior de las células modernas.

De Luca a los procariotas

Con todo ello, Luca y los organismos emparentados con él realizaron buena parte del intenso esfuerzo necesario para permitir la evolución de los primeros seres vivos. Sin embargo, Luca carecía de una membrana propia que pudiera acompañarle a todas partes, y su metabolismo también seguía anclado a los flujos de energía próximos a los respiraderos volcánicos submarinos. Además, parece que este remoto antepasado tampoco poseía el refinado mecanismo reproductivo presente en la mayoría de los organismos modernos y que encuentra su fundamento en un pariente cercano del ARN, el ADN y su doble hélice de bases nitrogenadas. En el estado actual de nuestros conocimientos sabemos cómo eran las estructuras que se

disponían a evolucionar, pero todavía no comprendemos cuáles fueron exactamente los cauces que siguieron dichos objetos en la progresión de su complejidad.

Aun así, la explicación de la evolución de las membranas protectoras individuales no reviste especial dificultad. Las membranas celulares están formadas por largas cadenas de fosfolípidos, y si se dan las condiciones adecuadas es fácil conseguir que esos fosfolípidos se unan y organicen en capas para constituir estructuras semipermeables parecidas a una burbuja. Como argumenta Terrence Deacon, es posible que las reacciones autocatalíticas evolucionaran y generaran estratos de fosfolípidos, molécula a molécula. De haber sido así, no resultaría descabellado suponer que alguna de las versiones más avanzadas de Luca lograra tejer por su cuenta una membrana personal.[20]

Más complicado resulta explicar cómo las células lograron desarrollar mejores formas de obtener energía y sistemas reproductivos más eficientes, pero los mecanismos que intervinieron en este proceso son tan fundamentales y tan elegantes que vale la pena tratar de entender cómo operan.

El desarrollo de nuevas formas de aprovechamiento de los flujos de energía capaces de permitir que las células primitivas se alejaran de las fumarolas volcánicas del suelo marino creó el equivalente celular de una red eléctrica, de modo que las moléculas quedaron en condiciones de enchufarse a ella mientras deambulaban de un lado a otro en sus quehaceres. En este proceso las enzimas desempeñaron un papel crucial. Las enzimas son moléculas especializadas que pueden actuar a modo de catalizadores, acelerando las reacciones celulares y reduciendo la energía de activación precisa para mantenerlas en funcionamiento. En la actualidad, las enzimas realizan operaciones importantísimas en todas las células. La mayor parte de las enzimas son proteínas y están formadas por largas cadenas de aminoácidos. La secuencia exacta de aminoácidos es muy relevante, puesto que determina cómo se pliega la proteína para adquirir la forma que requiere el trabajo concreto que debe

llevar a cabo. Las enzimas flotan sin rumbo fijo en el caldo molecular en busca de moléculas con las que puedan encajar, tal como puede suceder con una llave fija, que se adapta a una tuerca de un tipo y un tamaño concretos. Una vez ajustada, la enzima utiliza minúsculas cantidades de energía, bien para explotar las capacidades de la molécula, bien para doblarla, agrietarla, dividirla o unirla a otras moléculas. La mayor parte de las reacciones de nuestro cuerpo resultarían imposibles sin enzimas (o exigirían unas energías de activación tan elevadas que la célula quedaría dañada).

En cuanto la enzima logra que la molécula sobre la que se ha abalanzado adopte la forma que desea, se desentiende de su presa y sale a cazar otras moléculas susceptibles de doblegarse a su voluntad. También hay moléculas que pueden activar o desactivar las enzimas adhiriéndose a ellas y alterando levemente su forma. De este modo, como si se tratara de los miles de millones de transistores de un hipotético ordenador, las enzimas controlan la fantástica complejidad de las reacciones que tienen lugar en el interior de las células.

Como acabamos de explicar, las enzimas obtienen la energía que necesitan para desempeñar su labor del equivalente celular de una red eléctrica. Este sistema tuvo que evolucionar necesariamente en una fase muy temprana de la historia de la vida. Las moléculas de ATP, o adenosín trifosfato, transportan la energía hasta las enzimas y otras partes de la célula, y es probable que el ATP ya estuviera operando con toda intensidad en el interior de Luca. Las enzimas y otras moléculas aprovechan la energía del ATP quebrando un pequeño grupo de átomos y liberando así la energía que une a dicho grupo con la molécula. La molécula que de ese modo ve reducido parte de su contenido (y denominada ahora ADP, es decir, adenosín difosfato) se dirige a un generador especial de moléculas y este la recarga, sustituyendo los átomos perdidos por otros. Los generadores de moléculas tienen su fuente de energía en un notable proceso llamado «quimiosmosis» que, pese a haber sido descubierto en fechas muy recientes (en la década de 1960), parece haber

estado funcionando ya en tiempos de Luca. En el interior de cada célula, las moléculas alimenticias son trituradas para extraer de ellas la energía que contienen, y parte de esa energía se emplea en bombear protones desde el interior de la célula (donde la concentración de protones es baja) al exterior (en el que hay una elevada densidad de protones). Este mecanismo es muy similar al que se usa para cargar una batería, pues se crea un gradiente eléctrico entre el medio intracelular y el extracelular, generándose un voltaje parecido al que Luca pudo haber empleado en los respiraderos alcalinos oceánicos. Los generadores especiales de moléculas (la ATP sintasa, para quien se interese en las cuestiones técnicas) insertos en las membranas celulares se sirven del potencial eléctrico que generan los protones que atraviesan la pared de la célula para ingresar desde el medio externo en ella y hacer funcionar una serie de nanorotores. Actuando de un modo similar al de las cadenas de montaje rotativas, esos rotores cargan las moléculas de ADP devolviéndoles las moléculas que han perdido, y después las moléculas recargadas, que ya vuelven a ser de ATP, regresan al interior la célula y aguardan pacientemente a que otras moléculas se enchufen de nuevo a ellas y obtengan la energía que precisan para seguir operativas.

Esta elegante red eléctrica celular está presente en todas las células actuales. Gracias a ella, las células se desvincularon de los flujos de energía que se encuentran en las inmediaciones de las fumarolas volcánicas, lo que permitió a los más antiguos procariotas surcar los mares y gorronear la energía contenida en las moléculas alimenticias y a continuación emplearla para fabricar esas moléculas de ATP que, como hemos visto, tienen la facultad de suministrar la energía requerida para hacer funcionar los entresijos celulares.

Estos sutiles flujos de energía mantienen las complejas estructuras internas de las células del mismo modo que la fusión preserva las estructuras estelares. Del mismo modo que sucede en las estrellas, los flujos de energía hicieron posible que las primeras células vivas pagaran los impuestos que la entropía exige a cambio

de permitir la complejidad, dado que en las células, como en las estrellas, gran parte de la energía se dedica a sostener el funcionamiento de las estructuras complejas. Sin embargo, como también sucede en los soles, hay un montón de energía desperdiciada, porque no existe ninguna reacción cuya eficacia sea del cien por cien; y, por supuesto, a la entropía le encanta el derroche de energía. Tanto en las células como en las estrellas se necesitan flujos de energía altamente concentrados para satisfacer la fiscalidad entrópica y vencer la universal tendencia a la degradación.

En los organismos vivos, la energía desempeña una función nueva que no se advierte en las estrellas: crea copias de la célula. Estas copias permiten a las células hacer retroceder los frentes de la entropía, ya que la reproducción preserva sus estructuras complejas aun después de fallecidas las células particulares. Los descendientes de Luca fueron los encargados de desarrollar los elegantes y eficientes métodos reproductivos que todavía se siguen utilizando en nuestros días. Estos métodos se basan en una molécula clave, la del ADN, cuya estructura fue descrita originalmente en 1953 por Francis Crick y James Watson, que a su vez se apoyaron en las investigaciones previas de Rosalind Franklin. Son tantos los procesos evolutivos que dependen de la correcta comprensión del funcionamiento del ADN que vale la pena examinar con mayor detenimiento las características de esta portentosa molécula.

El ADN (ácido desoxirribonucleico) está íntimamente relacionado con el ARN (ácido ribonucleico). Ambos son polímeros, es decir, largas cadenas de moléculas similares, pero mientras que las proteínas están constituidas por secuencias de aminoácidos y las membranas celulares por capas de fosfolípidos, lo que forma el ADN y el ARN son largos filamentos de nucleótidos. Los nucleótidos son moléculas de monosacáridos a las que se unen pequeños grupos de moléculas conocidos como «bases». Las bases son de cuatro tipos: adenina (A), citosina (C), guanina (G) y timina (T). (En el ARN, el uracilo [U] sustituye a la timina.) Y ahí reside la magia. Como acertaron a mostrar Crick y Watson, estas cuatro bases pueden

combinarse como las letras de un alfabeto y actuar como vectores de enormes volúmenes de información. A medida que las moléculas de ADN o ARN se van uniendo para constituir inmensas cadenas, las bases se adhieren en los costados, dando lugar a una larga hebra de monómeros de adenina, citosina, guanina y timina (o de uracilo en el ARN). Cada grupo de tres letras codifica un aminoácido en particular o transmite una instrucción concreta (como por ejemplo: «Deja de leer ahora mismo»). De este modo, la secuencia TTA significa: «Añade una molécula del aminoácido leucina», y la combinación TAG es una especie de signo de puntuación que indica: «Vale, ya puedes dejar de copiar secuencias».

La información contenida en las moléculas de ADN o ARN pueden interpretarse y copiarse debido a que a las bases les gusta unirse unas a otras valiéndose de puentes de hidrógeno, que pueden formarse y deshacerse con gran facilidad. Sin embargo, esas uniones entre las bases solo se verifican de un modo muy concreto. La adenina se asocia siempre a la timina (o al uracilo en el caso del ARN), y la citosina con la guanina. Unas enzimas especiales dejan al descubierto pequeñas porciones de ADN (correspondientes a un gen determinado o al código de una proteína en particular) y después cada base atrae a su pareja para crear una nueva cadena corta de nucleótidos de ARN que viene a complementar la cadena original. El segmento recién creado enseguida es transportado hasta una voluminosa molécula conocida con el nombre de ribosoma y que viene a ser una especie de fábrica de proteínas. El «ribosoma» lee la secuencia de letras que forman los tripletes y fabrica, por extrusión, los aminoácidos pertinentes, uno por uno y exactamente en el orden preciso para elaborar una determinada proteína; y esta, una vez sale de la cadena de montaje, pasa a otra parte del citoplasma para realizar sus funciones. Este es el sistema que emplean los ribosomas para fabricar los miles de proteínas que necesita una célula.

El toque final de este número de prestidigitación consiste en que las moléculas de ADN y ARN tienen la capacidad de utilizar estos mecanismos de copiado para construir réplicas de sí mismas y de

toda la información que contienen. Las bases nitrogenadas que sobresalen a los lados de la hebra ribonucleica, formando protuberancias en las cadenas de glúcidos y grupos fosfato, se adentran en el plasma celular y se aferran a sus respectivas parejas complementarias. De esta manera, la citosina se une invariablemente a la guanina, y la adenina hace lo propio con la timina (o con el uracilo, si se trata del ARN). Nada más asociarse, las bases atraen nuevas moléculas de glúcidos, que también se ensamblan entre sí, y de ese modo dan lugar al surgimiento de una nueva cadena que es un complemento exacto de la primera. Por regla general, en el ADN estas dos cadenas complementarias aparecen unidas, y debido a ello la hebra del ADN suele formar una doble hélice, parecida a un par de escaleras de caracol. Además, puede enrollarse tan apretadamente sobre sí misma que cabe sin dificultad en el interior de todas y cada una de las células, no desplegándose sino para ser leída o hacer copias de sí misma. El ARN, en cambio, suele tener forma de cadena simple, de modo que, al igual que las proteínas, también puede plegarse y adoptar formas específicas, funcionando un poco a la manera de una enzima.

Esta pequeña diferencia entre el ARN y el ADN es de una importancia enorme, pues significa que el ADN actúa habitualmente como un mero sistema de almacenamiento de información genética, mientras que el ARN puede servir tanto para guardar información como para realizar tareas químicas. Por consiguiente, el ARN es a la vez una herramienta física y un soporte lógico, motivo que ha llevado a la mayoría de los investigadores a creer que hubo una época, en la que quizá todavía anduviera Luca por los alrededores, marcada por el hecho de recoger la mayor parte de la información genética en vectores de ARN. Es probable que Luca se desenvolviese en un mundo regido por el ARN. Sin embargo, como vehículo para el transporte de información, el ARN es menos seguro que el ADN, ya que sus codificaciones están sometidas al constante y violento zarandeo que impera en el citoplasma, mientras que la doble hebra de ADN protege su preciosa información del ciclón que ruge en el

exterior. En el mundo del ARN, la información genética puede perderse o distorsionarse con facilidad. La evolución no consiguió levantar el vuelo hasta que no surgió el mundo del ADN gracias a la acción de los descendientes de Luca, es decir, de los verdaderos procariotas (que son los que en la actualidad dominan el universo microbiano).

Al estar provistos de una membrana propia, de un metabolismo independiente y de una maquinaria genética más precisa y estable, los primeros procariotas pudieron abandonar los respiraderos magmáticos en los que habían nacido y vagar por los mares de la Tierra primitiva. Es probable que eso sucediera hace 3.800 millones de años.

Cada una de las células procariotas constituye un microcosmos presidido por una complejidad realmente asombrosa. Hablamos de un conjunto de miles de millones de moléculas nadando inmersas en un espeso caldo químico y respondiendo miles de veces por segundo a los avances y empujones de otras moléculas vecinas, un poco a la manera del turista que progresa apretujado en un bazar atestado de comerciantes, charlatanes y carteristas. Si nos redujeran de tamaño y nos inyectaran en una de esas moléculas, el universo que se abriría ante nuestros ojos nos parecería aterrador. Las enzimas intentarían abalanzarse sobre nosotros y cambiarnos, y tal vez consiguieran atarnos a otras moléculas para crear una brigada nueva capaz de recorrer los mercados en busca de nuevas oportunidades. Basta imaginar que en el interior de todas las células se materializan cada segundo millones de interacciones de ese tipo para hacernos una idea de la frenética actividad que anima a todas esas unidades básicas de la vida, tanto hoy como en tiempos de la biosfera primitiva, pese a que por entonces los microorganismos fueran más simples.

Este nuevo mundo de los seres vivos constituye un ámbito dotado de una complejidad igualmente novedosa. Como ya sucediera con las estrellas y los planetas formados en períodos dominados por cambios caóticos, también las células terminaron por

asentarse y alcanzar cierta estabilidad al empezar no solo a gestionar sino también a resistir las minúsculas fluctuaciones de energía de su entorno. Las células acabaron por conseguir un equilibrio temporal, y finalmente también las especies, los linajes e incluso algunos órdenes enteros lo lograron. Sin embargo, no fue en ningún caso un equilibrio de carácter estático. Se trató siempre de un equilibrio dinámico, mantenido invariablemente por una constante negociación entre los organismos vivos y las tornadizas condiciones del medio, de un equilibrio siempre expuesto al peligro de un súbito desmoronamiento.

Capítulo 5

LA MICROBIOLOGÍA Y LA BIOSFERA

> «Entonces, para que Estha y Rahel tuvieran un sentido de la perspectiva histórica [...], Chacko [...] les habló de la Señora Tierra. Les dijo que imaginaran que la Tierra —que tenía cuatro mil seiscientos millones de años— era una mujer de cuarenta y seis años. [...]. A la Señora Tierra le había llevado toda la vida convertirse en lo que era. Separar los océanos. Levantar las montañas. La Señora Tierra tenía once años, dijo Chacko, cuando aparecieron los primeros organismos unicelulares.»
>
> Arundhati Roy, *El dios de las pequeñas cosas*

Sumadas, la Tierra y la vida constituyen la biosfera.[1] El geólogo austríaco Eduard Suess (1831-1914) fue quien acuñó la palabra «biosfera». Suess veía la Tierra como una serie de esferas superpuestas y caracterizadas por compartir en ocasiones determinadas zonas. Entre ellas destacan por ejemplo la atmósfera (esto es, la esfera de aire), la hidrosfera (la esfera de agua) y la litosfera (los rígidos estratos superiores del planeta, entre los que se cuentan la corteza y las capas superficiales del manto). Fue, sin embargo, el geólogo ruso Vladimir Vernadsky (1863-1945) quien acertó a mostrar antes que nadie que la esfera de la vida había configurado la historia de la Tierra con tanta fuerza como los demás orbes, todos ellos inertes. Podemos comprender la realidad de la biosfera imaginándola como una fina envoltura de tejido vivo (a la que se añaden tanto los restos de dichos tejidos como la impronta

que dejan) que parte de las profundidades del océano, llega hasta la superficie de la Tierra y se extiende incluso a las capas inferiores de la atmósfera. En la década de 1970, James Lovelock y Lynn Margulis concibieron la biosfera como un sistema dotado de un gran número de mecanismos de retroalimentación que le permiten estabilizarse, al menos mientras no se produzcan conmociones de excesiva magnitud. Lovelock dio a este vasto sistema capaz de autorregularse el nombre de Gaia, en honor a la diosa griega de la Tierra.

LA GEOLOGÍA, O CÓMO FUNCIONA EL PLANETA TIERRA

La vida necesitó algún tiempo para coger impulso, así que empezaremos por considerar el mundo a la manera de un sistema de carácter puramente geológico, como si se tratara de un escenario antes de la llegada de los actores. Esto debería darnos la oportunidad de comprender con mayor facilidad los complejos dramas que los seres vivos interpretarían más tarde sobre las tablas.

Los violentos procesos de acreción y diferenciación con los que se forjó la Tierra primitiva dejaron tras de sí una fértil bola de materia organizada en distintas capas. Existía un núcleo ardiente y medio fundido, compuesto sobre todo de hierro y níquel, que generaba un campo magnético protector en torno del planeta. Ese núcleo se hallaba rodeado a su vez por una capa de tres mil kilómetros de grosor formada por gas, agua y minerales en estado viscoso: el manto. Las rocas más ligeras ascendieron a la superficie y dieron lugar a la corteza terrestre. Al aflorar a borbotones por las chimeneas volcánicas, los gases y el vapor de agua acabaron creando la primera atmósfera del planeta y sus océanos primitivos. Los meteoritos y los asteroides aportaron nuevos cargamentos de rocas, minerales, agua, gases y moléculas orgánicas.

Hace aproximadamente 3.800 millones de años, al reducirse el bombardeo espacial, el principal motor del cambio geológico pasó a ser el calor sepultado en las profundidades de la Tierra. Esas altas

temperaturas, al filtrarse a través de los intersticios del manto y la corteza para alcanzar la atmósfera, batieron a su paso los materiales de las diferentes capas, provocaron su transformación química, y generaron una serie de lentos ciclos de convección que imprimieron un movimiento circular a inmensos volúmenes de materia y gas. Como ya vimos al estudiar el desarrollo de las estrellas, la evolución geológica también recibió su principal impulso de los sencillos procesos alimentados por una acumulación inicial de energía (acumulación que, por cierto, no es renovable). Por consiguiente, los cambios que experimentó la Tierra se fueron concretando gracias a que la trasudación generada por el calor del núcleo acabó difundiéndose por el manto, la corteza y el espacio.

Las elevadas temperaturas del núcleo todavía animan una gran cantidad de procesos geológicos, y seguirán haciéndolo durante muchos miles de millones de años. Sin embargo, los geólogos no consiguieron comprender el funcionamiento de este titánico mecanismo terrestre hasta los años sesenta del siglo XX. El fundamento de su nueva visión de la geología se apoyaba en uno de los paradigmas más importantes de la ciencia moderna: el de las placas tectónicas.

Los seres humanos solo han podido visualizar la superficie de la Tierra en los últimos quinientos años, cuando dispusieron de naves capaces de circunvalarla. Aun así, la mayor parte de la gente continuó asumiendo que, a gran escala, la geografía mundial era prácticamente estática. Podían producirse erupciones volcánicas y a veces los ríos cambiaban de curso, pero se daba por sentado que el perfil de los continentes y los océanos, de las montañas, las corrientes de agua, los desiertos, los casquetes polares y los desfiladeros cruzaba los siglos sin ninguna variación. Pero hubo quien empezó a albergar algunas dudas. Siguiendo un derrotero similar al recorrido por Darwin al mostrar que la vida se había transformado profundamente en el transcurso de las eras, en el

terreno de la geología comenzaron a acumularse pruebas de que también la Tierra tenía tras de sí un historial de profundas metamorfosis.

En 1885, Eduard Suess sugirió que, hace aproximadamente doscientos millones de años, todos los continentes se hallaban unidos en un mismo supercontinente. Hoy sabemos que había dado en el clavo. Tres décadas más tarde, Alfred Wegener, un meteorólogo alemán que había efectuado investigaciones en Groenlandia, reunió una gran cantidad de pruebas que respaldaban la tesis de Suess. Wegener publicó esos datos en 1915, entre el estruendo de la primera guerra mundial, en un libro titulado (en lo que quizá fuera un guiño al *Origen de las especies* de Darwin) *El origen de los continentes y océanos*.* Si Darwin había propuesto que el desarrollo de los seres vivos era de carácter evolutivo, Wegener apuntaba entonces la idea de que los continentes y los océanos también se habían transformado de manera similar, por medio de un mecanismo al que denominó «deriva continental». Tras permanecer agrupados en un supercontinente llamado Pangea, o PanGaia (palabra griega que significa «toda la Tierra»), los continentes y los océanos habrían ido separándose poco a poco, con lo que su desplazamiento habría terminado situándolos en la posición que actualmente ocupan.

Wegener presentó abundantes pruebas de su hipótesis. Al observar un mapamundi, se apreciaba que, en alguna época, muchas de sus partes parecían haber estado encajadas, una circunstancia que ya se había advertido desde que en el siglo XVI empezaron a trazarse los primeros mapas globales. Poco antes del año 1600, un cartógrafo holandés llamado Abraham Ortelius, comentó que tenía la impresión de que las dos Américas habían sido «desgajadas» de Europa como consecuencia de alguna catástrofe.[2] Si observamos un mapa contemporáneo del mundo veremos que el hombro de Brasil se adapta a la perfección a la axila del África occidental y central, y que la costa del noroeste africano podría ensamblarse sin dificultad en el enorme arco del Caribe. En la

década de 1960, los geólogos cayeron en la cuenta de que ese acoplamiento es todavía más exacto si se fija uno en las plataformas continentales.

Wegener mostró que los fósiles de los antiguos reptiles hallados en Sudamérica y en el África central y meridional eran casi idénticos. A principios del siglo XIX, el científico alemán Alexander von Humboldt, uno de los primeros estudiosos en escribir una historia moderna de los orígenes, también apreció semejanzas entre las plantas litorales de África y Sudamérica.[3] A eso se añadían los estratos sedimentarios, que parecían comenzar en el África occidental y continuar en el flanco oriental del Brasil sin distorsión ni pérdida. Es lógico que, como meteorólogo que era, Wegener se interesara en particular por los datos climáticos. En el África tropical podían verse las elocuentes marcas y cicatrices dejadas por el avance de los glaciares. ¿Podría haber gravitado antiguamente esa región cálida en las inmediaciones del polo sur? En Groenlandia, Wegener había descubierto fósiles de plantas tropicales. No había duda de que algo había recorrido una larga distancia en un pasado muy remoto.

Sin embargo la fundamentación de una buena hipótesis científica requiere algo más que unas cuantas informaciones sugerentes. Si, por un lado, el hecho de haber publicado su obra en plena guerra no contribuyó en nada a divulgar el trabajo de Wegener, su nacionalidad alemana y el hecho de no ser geólogo dificultaron mucho que los especialistas del mundo de habla inglesa se tomaran en serio sus planteamientos. ¿De verdad había que considerar real la eventualidad de que los continentes estuvieran surcando los mares? Wegener no tenía ni idea de qué fuerza podía haberlos llevado de acá para allá, y a los ojos de la mayoría de los geólogos profesionales la ausencia de una explicación bastaba para desdeñar esta hipótesis. En noviembre de 1926, la teoría de la deriva continental de Wegener fue definitivamente rechazada por la prestigiosa Asociación Americana de Geólogos del Petróleo. El asunto parecía quedar zanjado.

Salvo porque despertó la curiosidad de un puñado de geólogos. En 1928, uno de estos geólogos, el británico Arthur Holmes, planteó el argumento de que el interior del planeta podría hallarse a una temperatura lo suficientemente elevada como para comportarse a la manera de un líquido de alta viscosidad, como ocurre con la lava. De ser así, el desplazamiento de los materiales presentes en las entrañas de la Tierra podría provocar el flotamiento de los continentes, permitiendo que se movieran por la superficie del globo. No obstante, habría que esperar hasta la década de 1950 para que nuevas pruebas pusieran de manifiesto que Wegener, Holmes y otros defensores de la noción de la deriva continental iban bien encaminados.

Y aquí irrumpe en nuestro relato el sonar (acrónimo de la expresión *sound navigation and ranging*, o «navegación y medición por sonido»). La tecnología del sonar permite detectar y localizar objetos sumergidos haciendo rebotar señales acústicas sobre su superficie y analizando después el eco recibido. Algunos animales, como los delfines y los murciélagos, utilizan el sonar. Tanto la tecnología del sonar humano como la de la datación radiométrica surgieron de los trabajos científicos vinculados al esfuerzo bélico (en este caso para detectar la presencia de submarinos enemigos). Harry Hess, un profesor de geología de la Universidad de Princeton, había ejercido el cargo de comandante de la Armada durante la segunda guerra mundial y había empleado el sonar para cartografiar el suelo oceánico, que por entonces era un territorio desconocido por completo para los geólogos marinos. Lo que la mayoría de ellos esperaba atestiguar era que el fondo del mar se reducía a una especie de llanura cenagosa formada por los sedimentos que la erosión había arrancado a los continentes. Sin embargo, lo que Hess comprobó fue que el océano Pacífico estaba recorrido en su base por una larga serie de cordilleras volcánicas. Ningún geólogo había previsto semejante resultado. A principios de los años cincuenta, tras descubrir una cadena montañosa muy parecida en medio del Atlántico, Hess empezó a elaborar una teoría para explicar esas

dorsales meso-oceánicas. En esta tarea contó con la ayuda del paleomagnetismo, es decir, los estudios que analizan las propiedades magnéticas de las zonas abisales. Por entonces ya se sabía que, en intervalos de unos cuantos cientos de miles de años, los polos magnéticos norte y sur de la Tierra se invierten, de modo que se trata de un suceso muy frecuente. Estos basculamientos dejaron un rastro en la lava que se filtraba por las grietas del fondo marino porque a medida que el magma fue solidificándose adoptó la orientación magnética predominante. Las mediciones de la dirección del campo magnético terrestre llevadas a cabo en las rocas de ambos lados de las dorsales volcánicas mostraron que la orientación magnética se invertía en una sucesión de vuelcos de norte a sur y viceversa a medida que las catas se alejaban de las crestas submarinas. Esto desconcertó a Hess.

Hasta que comprendió que lo que provocaba el surgimiento de las cordilleras del fondo del océano era el magma que se filtraba por las hendiduras de la corteza oceánica. Tenía sentido, porque esa corteza submarina es menos gruesa que la de los continentes, de modo que la lava puede perforarla con facilidad. Al ascender por las resquebrajaduras de la costra abisal, el magma apartaba bruscamente los labios de la abertura longitudinal por la que afloraba y creaba así un nuevo fondo, marcado con la impronta de la orientación magnética correspondiente al período en el que se formó. La alternancia del magnetismo que presentaban las rocas de las dorsales meso-oceánicas permitía establecer la fecha en que se habían elevado esas cordilleras subacuáticas.

Aún hay más, porque tras estos descubrimientos se ocultaba el motor de la deriva continental que Wegener había buscado en vano. Esos enormes volúmenes de magma ardiente que brotaban del manto terrestre y se colaban por las grietas de la corteza oceánica eran precisamente los que creaban y desplazaban las cadenas montañosas, los continentes y el fondo del mar. Las altas temperaturas del magna se deben a la presencia de elementos radioactivos y al calor que irradia el núcleo de la Tierra, en el que se

conserva buena parte de la energía almacenada durante los violentos procesos de acreción y construcción del planeta. Y justamente ahí, en el centro de la Tierra, se encontraba el propulsor ignorado. Igual que sucede con la fusión que reina en el núcleo de una estrella, el calor que sale de la médula terrestre es lo que moviliza los procesos geológicos más relevantes que se producen en su superficie.

Hoy disponemos de abundantes pruebas de que la corteza terrestre, tanto oceánica como continental, está rota y forma distintas placas que forcejean a empujones en su intento de encontrar una posición estable en el constante movimiento de arrastre que provoca el magma viscoso en el que flotan y que las lleva de un lado a otro. Los magmas calientes que afloran desde las profundidades de la Tierra circulan bajo la corteza, como hace el agua al hervir en un cazo. Estas corrientes convectivas de roca y lava a medio fundir son las que mueven las placas tectónicas que sobrenadan por encima de ellas. Los detallados estudios de las bandas paleomagnéticas han permitido a los especialistas en las ciencias de la Tierra analizar el recorrido de estas placas a lo largo de varios cientos de millones de años, lo que nos da una idea muy precisa de los cambios que la morfología geográfica ha experimentado en, pongamos por caso, los últimos mil millones de años. Actualmente sabemos que esos movimientos crearon supercontinentes como Pangea y que después se fracturaron y disgregaron varias veces, en un proceso cíclico que probablemente se inició a principios de la era proterozoica, hace unos dos mil quinientos millones de años. Lo más probable es que antes de ese período no hubiera grandes continentes. Aun así, algunos geólogos argumentan que los mecanismos de la tectónica de placas pudieron haberse puesto en marcha en una época muy anterior. Las pruebas que nos proporciona el eón Hádico sugieren que hace 4.400 millones de años ya existía algún tipo de tectónica de placas, de lo que se deduce que esta comenzó en cuanto la Tierra se estructuró en distintas capas.[4]

La tectónica de placas reveló ser una idea enormemente unificadora, tanto como la cosmología del Big Bang. Con ella se explicaba y mostraba la existencia de vínculos entre muchos procesos diferentes, desde los terremotos hasta el surgimiento de los montes, pasando por la deriva de los continentes. Esta tesis da explicación también de por qué hay tantos acontecimientos geológicos violentos en los puntos en que las placas tectónicas entran en contacto, abriéndose paso con colosales esfuerzos de fricción, ya sea para rodearse, superponerse o zambullirse. La tectónica de placas también explica el intenso dinamismo terrestre, ya que no solo se da la circunstancia de que la superficie se renueva constantemente con la llegada de nuevos materiales del manto, sino que, a su vez, los componentes de esta también descienden por subducción a las profundidades del planeta.

Para comprender con detalle el funcionamiento de la tectónica de placas resulta muy útil centrarse en los límites de las placas tectónicas. En los bordes divergentes, como los que describió Harry Hess, el material se eleva desde el manto y separa las placas. Sin embargo, en otros puntos (los bordes convergentes), las placas chocan entre sí. Si ambas placas litosféricas tienen aproximadamente la misma densidad —si se trata, por ejemplo, de dos placas continentales de naturaleza granítica—, lo que sucede es algo a similar a la pelea de dos morsas macho enfrentadas por la conquista de las hembras, ya que las masas terrestres se yerguen como si se encabritaran. Así se formó el Himalaya: en los últimos cincuenta millones de años, la placa índica, que viajaba a gran velocidad, se desplazó al norte, partiendo de la Antártida, y colisionó con la placa euroasiática. En cambio, si el choque se produce entre dos placas de densidades distintas, si, por ejemplo, una está constituida por una corteza oceánica pesada, de tipo basáltico, y la otra contiene una corteza continental más ligera por estar hecha de granito, el fenómeno resultante es muy diferente. Al llevar mayor lastre, la placa oceánica se sumerge bajo la más liviana siguiendo una línea irregular que recibe el nombre de zona de subducción. La

placa pesada desciende de repente, como un ascensor en caída libre que se estrella contra un suelo de cemento, y arrastra en su hundimiento materiales de la corteza, que de este modo regresan al manto, donde se disuelven junto con la propia placa. Al perforar el manto, la placa descendente genera un rozamiento y un calor tan extraordinarios que la corteza de la parte superior puede llegar a fundirse, abriéndose y permitiendo que el magma la taladre, lo que da lugar al surgimiento de nuevas cadenas montañosas. Este fue el proceso que generó la aparición de los Andes, cuando la placa del Pacífico penetró bajo la que contiene la costa occidental de Sudamérica.

Existen por último los llamados «bordes impactantes» (también conocidos como «fallas transformantes»). En este caso, las placas se rozan al cruzarse como dos trozos de papel de lija frotados uno contra otro y empujados en direcciones opuestas. En un primer momento la fricción impide que las placas se disloquen, pero al final la presión acumulada es tal que se produce una brusca y violenta sacudida. De aquí proviene el creciente empuje que afecta a la Falla de San Andrés, en la costa occidental de Norteamérica. (Durante el tiempo que viví en San Diego, tuve ocasión de sentir de vez en cuando temblores de tierra, y como muchos californianos, tuve que contratar un seguro contra los seísmos.)

La circulación de materiales entre la atmósfera, la superficie y el manto ejerció un impacto muy profundo en la actividad química de las capas superiores de la Tierra, pues generó nuevos tipos de rocas y minerales. Cuando empezó a prosperar la vida fuera del agua, los procesos químicos que habían estado desarrollándose en el interior del manto habían logrado crear ya nada menos que mil quinientos tipos de minerales diferentes.[5] La tectónica de placas dotó al planeta Tierra de un dinamismo químico y geológico excepcional.

La tectónica de placas también incidió en las temperaturas de la superficie de la Tierra primitiva, y ya hemos visto que el hecho de contar o no con los grados adecuados fue crucial para la historia de la vida en nuestro planeta. Dos grandes fuerzas determinan las

temperaturas medias de la superficie de la Tierra: el calor que procede del interior y el que recibimos del sol. Es posible calcular aproximadamente el valor de ambas influencias, pero la composición de la atmósfera contribuye a establecer qué cantidad de calor logra retener la superficie de la Tierra y qué parte de ese calor escapa al espacio exterior. En este sentido, el porcentaje de gases de efecto invernadero reviste una particular importancia. Estamos hablando de gases como el dióxido de carbono y el metano, que tienden a atrapar la energía de la radiación solar en lugar de reflejarla y enviarla de vuelta al espacio. Por regla general, cuanto mayor sea el volumen de gases de efecto invernadero en la atmósfera, mayores serán también las temperaturas medias del planeta. Así las cosas, cabe preguntarse: ¿qué controla los niveles de esos gases de efecto invernadero?

El astrónomo Carl Sagan (uno de los grandes precursores de la historia moderna de los orígenes) señaló que es vital dar una respuesta a este interrogante porque podría ayudarnos a resolver otro enigma. La cantidad de energía que emiten las estrellas similares a nuestro sol aumenta en proporción directa a su edad, lo que significa que el calor que recibe la Tierra ha estado incrementándose poco a poco desde que se formó. Cuando nuestro planeta era joven, el sol emitía un 30 % menos de energía que en la actualidad. Entonces, ¿cómo es que la Tierra primitiva no se convirtió en una bola de hielo de temperaturas demasiados frías para propiciar el surgimiento de la vida, como le ocurre hoy a Marte? Carl Sagan dio a este problema el nombre de «paradoja de la debilidad de la fase juvenil del sol».

Resultó que la solución al enigma residía en la dosis de gases de efecto invernadero que contenía la atmósfera. Los niveles de aquellos tiempos iniciales eran lo bastante altos como para caldear la Tierra primitiva y posibilitar el desarrollo de la vida. La primera atmósfera del globo contaba con muy poco oxígeno libre, pero tenía en cambio grandes cantidades de gases de efecto invernadero, sobre todo vapor de agua, metano y dióxido de carbono, todos ellos

surgidos del manto a través de los conductos volcánicos o llegados a bordo de asteroides. La existencia de una atmósfera constituida por gases de efecto invernadero era una de las más importantes condiciones Ricitos de Oro para el surgimiento de la vida en la joven Tierra.

Ahora bien, ¿qué estabilidad tenía esa atmósfera repleta de gases de efecto invernadero? O por exponerlo con una pregunta más general, ¿qué garantía había de que, a medida que el sol empezara a emitir más energía, la superficie de la Tierra permaneciera en el mágico rango de temperaturas comprendido entre los cero y los cien grados Celsius? En los años setenta del siglo xx, James Lovelock y Lynn Margulis argumentaron que todos los indicios hacían pensar en la existencia de un conjunto muy potente de mecanismos autorreguladores capaces de mantener la temperatura de la superficie de la Tierra en esa horquilla Ricitos de Oro. Como ya hemos señalado, ambos autores dieron a ese hipotético sistema el nombre de Gaia. Esta noción incluye la totalidad de las relaciones que se dan entre la geología de la Tierra y los seres vivos que la habitan, lo cual conserva a su vez las acogedoras condiciones que el planeta ofrece a todo lo viviente. Son muchos los científicos que contemplan con escepticismo la hipótesis de Gaia, pero no hay duda de que la biosfera cuenta con mecanismos de retroalimentación, y que muchos de ellos actúan como termostatos, de modo que hasta cierto punto consiguen regular la temperatura de la superficie terrestre. Algunos de esos mecanismos son de naturaleza geológica, pero otros operan por medio de los organismos vivos.

Uno de los termostatos más relevantes es puramente geológico, así que debió de ponerse en marcha antes incluso de que surgiera la vida en el planeta. Este termostato asocia la actividad tectónica con otro de los motores que impulsan el cambio en el planeta: la erosión. Si la tectónica levanta las montañas, la erosión las deshace. El viento, el agua y los distintos tipos de flujos químicos resquebrajan las peñas de las cordilleras y las arrojan al mar

valiéndose de los gradientes gravitatorios. La erosión es la responsable de que las montañas no sean mucho más altas de lo que son, y la tectónica explica por qué no se han desvanecido todas, convirtiendo el mundo en una única e inmensa llanura. Como es obvio, la erosión es a su vez un subproducto de la propia tectónica, puesto que tanto el viento como la lluvia salieron expelidos de las entrañas de la Tierra. Por otra parte, la formación de las montañas puede acelerar la erosión, ya que la gravedad hace que las corrientes de agua de las cumbres se conviertan en torrentes destructivos que esculpen la tierra y transportan rápidamente al océano los materiales del suelo.

Examinemos con algún detalle el funcionamiento del termostato geológico. El dióxido de carbono, que es uno de los gases de mayor efecto invernadero, se disuelve en el agua de la lluvia y cae sobre la superficie del planeta en forma de ácido carbónico. Este es capaz de disolver los componentes de las rocas, y la lluvia arrastra los productos resultantes de esas reacciones (que contienen grandes cantidades de carbono) hasta los océanos. Una vez allí, parte del carbono queda atrapado en las rocas carbonatadas. Allí donde las placas tectónicas se sumergen en el manto, es decir, en las zonas de subducción, parte de ese carbono (buena parte de él en forma de piedra caliza) queda enterrado bajo la superficie de la Tierra durante millones o incluso miles de millones de años. De este modo, esa especie de cinta transportadora que es la mecánica tectónica recoge el carbono de la atmósfera, con lo que, al final, se reducen los niveles de dióxido de carbono y el clima se vuelve más fresco. En la actualidad sabemos que hay mucho más carbono sepultado en el manto del que pueda encontrarse en la superficie de la Tierra o en su atmósfera.

Como es obvio, mediante este sistema si se enterrara demasiado dióxido de carbono, la Tierra se congelaría. Pero esto lo impide (en la mayoría de las ocasiones) el segundo elemento del termostato geológico. Movilizado por la tectónica de placas (con la mecánica que acabamos de ver, y que probablemente no funcione en el helado

Marte), el dióxido de carbono puede regresar a la atmósfera en diferentes zonas, allí donde el material del manto, incluido el dióxido de carbono enterrado, asciende a la superficie a través de los volcanes.[6] Existe un equilibrio entre los dos componentes de este dispositivo, pues el incremento de las temperaturas provoca un incremento de las precipitaciones, lo que acelera la erosión y devuelve más carbono al interior del manto. Ahora bien, si el planeta se enfría demasiado, las lluvias empezarán a escasear, se enterrará menos dióxido de carbono, los niveles de este gas aumentarán (puesto que seguirá bombeándose al exterior por las toberas volcánicas) y esto volverá a caldear el ambiente. El termostato geológico lleva cuatro mil millones de años ajustándose al aumento de la energía calorífica que emite el sol.[7]

No nos consta que en los demás planetas de nuestro sistema solar suceda nada parecido. Las imágenes que tenemos de Venus nos permiten hacernos una idea aproximada del aspecto que podría tener la Tierra si su atmósfera hubiese conservado un excesivo volumen de dióxido de carbono. En la actualidad, la atmósfera de Venus contiene enormes cantidades de este gas, y da la impresión de que el efecto invernadero que sufre ese planeta está totalmente fuera de control. La temperatura de su superficie es tan alta que el agua se evapora y el plomo se derrite. En la encrucijada de la vida, Marte tomó otro rumbo; equivocado. Su tamaño era demasiado pequeño para que su gravedad lograra retener los gases de efecto invernadero, de modo que estos se perdieron en el espacio. El planeta se enfrió, así que la mayor parte del agua que contiene se presenta en forma de hielo. El astromóvil Curiosity, un vehículo destinado a la exploración espacial que recorrió una zona de la superficie marciana, ha mostrado que hubo un tiempo, hace miles de millones de años, en el que había corrientes de agua en la superficie del planeta, lo que significa que podrían haber prosperado en él algunas formas de vida simples. Pero hace mucho que esas condiciones dejaron de darse. Sea como fuere, ni Marte ni Venus parecen disponer de un mecanismo similar al de la tectónica de

placas, lo que les priva de uno de los componentes clave del termostato terrestre. Además, las dimensiones de Marte son demasiado reducidas para que el planeta conserve el calor interno necesario para impulsar la tectónica de placas. Por otra parte, al haber evaporado casi la totalidad del agua que contenía, es posible que Venus haya dejado a la tectónica de placas sin el lubricante acuoso que contribuye a que esas losas litosféricas consigan cruzarse, solaparse o hundirse.[8]

El termostato geológico distaba mucho de ser perfecto, y hubo momentos en que pareció estar a punto de descomponerse, cosa que habría tenido funestas consecuencias para la biosfera. Sin embargo, con el tiempo acabaron por desarrollarse otros termostatos, y fueron justamente las actividades de los organismos vivos lo que permitió la aparición de estos nuevos mecanismos. Por eso debemos volver a ocuparnos del papel que desempeñó la vida al irrumpir los seres vivos en la escena geológica y comenzar a explorar —y en último término, a transformar— sus numerosísimos rincones y recovecos ecológicos.

La unidad de la vida

A pesar de las profundas diferencias que separan al *Tyrannosaurus rex* de la bacteria *E. coli*, en muchos aspectos relevantes la vida está notablemente unificada. Todos los organismos vivos de nuestros días están emparentados desde el punto de vista genético, sobre todo aquellos que utilizan, a semejanza de lo que ocurre con las subrutinas de los programas informáticos, sistemas básicos de gestión interna para la realización de sus tareas. En las células, esas labores pueden ser, entre otras, las relacionadas con la degradación de las moléculas de las sustancias alimenticias para aprovechar su energía o utilizar sus componentes químicos, o las

asociadas con el transporte de la energía y los átomos de un lado a otro. Esto explica que sea difícil distinguir un ser humano de una ameba cuando descendemos al plano celular.

Actualmente, los biólogos pueden seguir el rastro de los vínculos genéticos que existen entre todos los organismos vivientes mediante la comparación de las larguísimas secuencias de adeninas, citosinas, guaninas y timinas de sus respectivas cadenas de ADN. En este sentido, la regla más importante indica lo siguiente: cuanto mayor sea el grado de divergencia entre dos genomas, mayor será también el tiempo transcurrido desde el momento en que ambas especies se hallaban unidas en un antepasado común —y aquí debemos añadir que sabemos aproximadamente a qué velocidad se diversifican los diferentes tipos de genomas—. Esto nos permite afirmar con cierta garantía que los seres humanos y los chimpancés partieron de un tronco compartido hace siete u ocho millones de años, y que los seres humanos y los plátanos llevan unos ochocientos millones de años transitando sendas genéticas diferentes. La comparación del ADN de las diferentes especies vivientes nos permite trazar unos árboles genealógicos mucho más detallados, y probablemente más exactos, que los basados solo en los registros fósiles.

Los biólogos clasifican la totalidad de los seres vivos en tres grandes ámbitos: Arquea y Bacteria, íntegramente formados por organismos procariotas unicelulares, y Eucaria, constituido tanto por entidades monocelulares de mayor complejidad como por individuos pluricelulares similares al nuestro. Este sistema de clasificación moderno se desarrolló a partir de los estudios taxonómicos (o de ordenación sistemática) de Carl Linneo, un célebre biólogo sueco del siglo XVIII. Linneo agrupó el conjunto de los seres vivos en una serie de clases encajadas sucesivamente unas en otras al modo de las muñecas rusas. El nivel taxonómico más bajo, el de la especie, contenía una única entrada. El siguiente nivel era el género, en el que se reunía un grupo de especies íntimamente relacionadas entre sí. Definidos por su género y su especie, los seres humanos modernos se conocen con el nombre de *Homo sapiens*. El género

Homo incluye a nuestros hoy extintos antepasados *Homo habilis* y *Homo erectus* (llamado también *Homo ergaster*). A partir de aquí, los niveles taxonómicos empiezan a dar cabida a un creciente número de grupos: en orden ascendente tenemos la familia, el orden, la clase, el filo, el reino y el dominio. Podemos decir por tanto que los seres humanos pertenecemos a la especie *sapiens*, al género *Homo*, a la familia de los homínidos, al orden de los primates, a la clase de los mamíferos, al filo de los cordados (es decir, de los vertebrados), al reino animal y al dominio de los eucariotas.

No hay duda de que los primeros seres vivos se diversificaron a toda velocidad, puesto que acababan de penetrar en un territorio evolutivo inexplorado. Entre esos primeros organismos debieron de persistir también muchos de los zombis a medio camino entre lo vivo y lo inerte que ya vimos al hablar de Luca. Así es como se describe en un reciente libro sobre la historia de la vida en la Tierra el extraño mundo de aquella primitiva animación:

> Imaginémonos un gigantesco zoológico con especies vivas, casi vivas o en plena evolución hacia la vida. ¿Qué habría en ese zoo? Un enorme número de criaturas de mil clases, todas ellas dotadas de ácidos nucleicos, un hervidero de cosas que ya no existen y que precisamente por eso carecen de nombre. También debemos pensar en complejas amalgamas químicas. Y toda esta inmensa colección de seres vivos y seudoanimados debía de desenvolverse en un ecosistema tan floreciente como competitivo y desorganizado: *el período de mayor diversidad de la vida en la Tierra*.[9]

A principios del eón Arcaico (que tuvo su inicio hace cuatro mil millones de años), los mecanismos reproductivos empezaron a funcionar con mayor eficiencia, los genes ganaron en estabilidad, y los límites entre el mundo de lo vivo y de lo casi vivo quedaron establecidos con mayor precisión. Llegadas las cosas a este punto fue cuando la selección natural, en el sentido darwiniano del término, pudo emprender verdaderamente el vuelo. No obstante, después de iniciada su andadura, la vida no contaba con ninguna garantía de supervivencia. Tal vez Marte y Venus albergaran en algún momento formas sencillas de vida. Pero si fue así, lo cierto es

que los organismos vivos se extinguieron rápidamente en ambos planetas. De hecho, la permanencia de esa fina capa de verdín animado de la Tierra dependería, también aquí, y durante cerca de cuatro mil millones de años, de que un montón de cosas salieran bien.

Los procariotas: un mundo de organismos unicelulares

Es probable que los primeros seres vivos pertenecieran al dominio de las arqueas, aunque las criaturas del segundo dominio, el de las bacterias, también aparecieron enseguida. Ambos dominios estaban constituidos exclusivamente por procariotas, es decir, por un conjunto de organismos unicelulares carentes tanto de núcleo bien diferenciado como de cualquier otro tipo de orgánulo celular especializado. Los procariotas dominaron la biosfera durante más de las siete octavas partes de su historia (casi el 90 %), ya que esta situación se mantuvo hasta hace unos seiscientos millones de años. Si acabamos encontrando seres vivos en algún otro planeta de nuestra galaxia, lo más probable es que no podamos estrecharles la mano sino que debamos contentarnos con observarlos a través de un microscopio.

Los procariotas son tan pequeños que si se reunieran cien mil y decidieran dar una fiesta, podrían hacerlo en el punto ortográfico que remata esta frase. Los genes de los procariotas flotan libremente en forma de anillos y filamentos en el salado cieno molecular de su citoplasma, de modo que su ADN sufre constantes zarandeos, como todo cuando nada en ese líquido intracelular, así que no es difícil que acabe dañado o alterado. De hecho, incluso es posible que algunos trocitos de material genético consigan traspasar las membranas celulares y emigrar a otras células. En el universo de los procariotas son muchas las ideas genéticas que se difunden de forma transversal, entre individuos no relacionados entre sí, aunque evidentemente también se transmiten en sentido vertical, es decir,

de los genitores a su descendencia. El intercambio de genes de los procariotas es muy parecido a lo que hacemos los seres humanos al pasar de mano en mano las acciones y participaciones de una compañía, razón por la que la noción de especie diferenciada resulta más difícil de definir en el mundo de estos organismos unicelulares que en el nuestro.

En la actualidad, los procariotas siguen dominando la biosfera. Es probable que tengamos sobre nuestro cuerpo y dentro de él más células procariotas que células dotadas de nuestro propio ADN. Sin embargo, no advertimos su presencia (si no nos provocan un dolor de estómago o un resfriado) porque su tamaño es muy inferior al de las células de nuestro organismo. Este inmenso universo en la sombra que compartimos con los procariotas se conoce con los nombres de «microbioma» o «microbiota».

Hasta hace poco resultaba tentador pensar que el desarrollo de los organismos unicelulares era muy tedioso, ya que de ese modo podíamos permitirnos el lujo de pasar por alto los primeros tres mil millones de años de historia de la biosfera. Hoy estamos comprendiendo que no será posible conferir sentido a la reciente historia de la biosfera si no conseguimos entender los pormenores del dilatadísimo período presidido por la vida microbiana. A medida que fueron evolucionando, los procariotas aprendieron a desarrollar muchos trucos nuevos que les permitieron explotar distintos entornos, y de hecho, nosotros mismos seguimos utilizando varias de las técnicas bioquímicas que esos organismos descubrieron y probaron antes que nadie.

Todos los procariotas son capaces de procesar información. En cierto sentido, puede incluso afirmarse que son capaces de aprender. No solo cuentan en sus membranas con miles de sensores moleculares que detectan los gradientes de luz y de acidez, sino que también pueden percibir si hay algún elemento nutritivo o tóxico en las inmediaciones y determinar si han chocado o no contra algo duro. Estos sensores están hechos de proteínas, y estas, como todas las enzimas, poseen puntos de enlace que se adhieren a moléculas

concretas situadas en el exterior de la célula o que reaccionan a los cambios de luminosidad, acidez o temperatura. En cuanto esas proteínas localizan algo, su morfología se modifica ligeramente, lo que envía un mensaje al interior de la célula. La estudiadísima bacteria *E. coli*, por ejemplo, dispone de cuatro tipos de moléculas sensoriales diferentes engarzadas en sus paredes celulares, y, considerados en conjunto, esos elementos pueden descubrir la presencia de cincuenta tipos distintos de cosas buenas o malas en su entorno inmediato.[10] Una vez que los sensores han detectado algo, la célula puede tomar una decisión. Puede optar, por ejemplo, por dejar que determinadas moléculas atraviesen sus membranas (si parecen ser de naturaleza alimenticia) o llegar a la conclusión contraria y preferir que permanezcan en el exterior (porque tienen pinta de nocivas). El proceso de toma de decisiones puede ser muy simple. Es posible hacerlo funcionar a partir de un reducidísimo número de datos de entrada y lograr que precise solo respuestas de «sí» o «no». «¿Debería dejar que esta molécula entre o no?» O: «¡Caramba, aquí empieza a hacer demasiado calor! ¿Será mejor que me mueva?». En cualquier caso, lo cierto es que hasta los sensores más simples consiguen generar toda una serie de esquemas elementales del entorno celular. En cuanto el microorganismo toma la decisión de desplazarse, se activan todos los sistemas que la célula posee para controlar el movimiento. En el caso de muchas bacterias este equipo locomotor es una especie de tentáculo o flagelo capaz de girar o vibrar y actuar como una hélice. La *E. coli* tiene, engastados en sus membranas, seis de estos apéndices filiformes parecidos a un látigo. Cada uno de ellos está constituido por veinte componentes distintos y puede agitarse con un movimiento helicoidal varios cientos de veces por segundo, impulsado por la energía que le proporcionan los gradientes de protones que atraviesan sus paredes. En caso necesario, los flagelos pueden rotar de común acuerdo y propulsar a la célula en una dirección más precisa.[11] El vínculo que asocia las percepciones de los sensores de la membrana con las reacciones de los flagelos

implica que, de hecho, la *E. coli* cuenta con una memoria a corto plazo. Tal vez solo dure unos segundos, pero es lo suficientemente potente como para decir: «¡No hay ningún problema: no es preciso hacer nada!» o «Esto no es bueno: flagelos, ¡inicien vibración!». La memoria a corto plazo se basa en la ocurrencia de minúsculos cambios en los sensores y en las sustancias químicas que emiten.

Estamos, por tanto, ante un sistema de procesamiento de la información muy sencillo, pero tenemos ya los tres componentes clave de todos los métodos biológicos dedicados a la gestión de la información: datos de entrada, procesamiento y datos de salida.

La facultad de gestionar la información dio a los procariotas una mayor capacidad de control de los flujos locales de energía. Con el tiempo, estos organismos fueron evolucionando para que la obtención, el dominio y el tratamiento de la energía pudiera efectuarse en los numerosos y diferentes entornos que les ofrecían los océanos del planeta. Es probable que los primeros procariotas fueran quimiótrofos, es decir, que extrajeran su energía de las reacciones geoquímicas que se daban entre el agua y las rocas, por la doble razón de que estas liberaban sustancias simples (como el ácido sulfhídrico y el metano) y de que esos microbios primitivos poseían los medios precisos para aprovechar la energía química de tales productos.[12] No obstante, en los océanos primitivos la presencia de sustancias químicas de fácil digestión y susceptibles además de liberar la energía de forma muy lenta eran muy escasos. Solo se encontraban en algunos entornos raros, como las fumarolas submarinas. La existencia de este inconveniente debió de reducir las posibilidades de avance de la vida en la Tierra. Aun así, algunos procariotas aprendieron enseguida a comerse a sus semejantes. Estos organismos fueron, por tanto, los primeros seres heterótrofos de la biosfera, una suerte de equivalente de los posteriores carnívoros, como el *Tyrannosaurus rex*. Usted y yo también somos heterótrofos, puesto que obtenemos la energía que nos nutre ingiriendo otros organismos, no comiendo productos químicos. Pero

incluso el recurso de consumir la materia de otros seres vivos tiene sus limitaciones si el conjunto de la biosfera depende de una cadena energética anclada al fondo de los océanos.

La fotosíntesis: una abundancia de energía y una revolución

Hace aproximadamente tres mil quinientos millones de años, la irrupción de una nueva innovación evolutiva, la fotosíntesis, permitió que algunos organismos aprovecharan los flujos de energía del sol. Se iniciaba así el primer período de abundancia energética del mundo vivo, y su impacto sobre los procariotas fue similar al que nosotros experimentaríamos si descubriésemos una mina de oro.

Los fotones que nos llegan del sol tienen una energía varios miles de veces superior a la de los fatigados y antiquísimos fotones de la radiación de fondo cósmica. La explotación de ese colosal flujo de energía cambió por completo las reglas del juego. A partir de entonces, y pese a que la vida siguiera reciclando toda la materia que utilizaba (y de ahí el interés de los científicos en los flujos de carbono, nitrógeno y fósforo), empezó a reinar la sensación de que la energía era poco menos que ilimitada.[13] De pronto, las células vivas disponían de la energía necesaria para reorganizar sus propias estructuras y modelar su entorno, y podían hacerlo además a una escala totalmente nueva. El radio de acción de su capacidad expansiva aumentó y el volumen de la materia viva creció varios órdenes de magnitud.

Pero ¿cómo utilizan la luz del sol los organismos vivos? Existen varios tipos de reacciones fotosintéticas susceptibles de transformar la luz del sol en energía biológica, y cada una de ellas lo consigue con un grado de eficiencia diferente y liberando subproductos distintos. Todas esas reacciones usan los fotones energéticos recién llegados del sol para animar a los electrones a introducirse en unas moléculas extremadamente sensibles a la luz (como la clorofila, por ejemplo). Esto produce en los electrones una conmoción tan grande

que terminan por saltar de las órbitas de sus átomos para caer en manos de las proteínas, que los secuestran sin que ellos dejen de agitarse en ningún momento. Las proteínas forman una suerte de cadena humana y franquean el paso a esos electrones de alta energía, que atraviesan así las membranas celulares. Esto crea un gradiente eléctrico entre el interior y el exterior de la pared de la célula que puede utilizarse a su vez para recargar las moléculas transportadoras de energía, como el ATP. Esto nos vuelve a situar ante un proceso de quimiosmosis, pero en este caso la energía que repone el potencial de las moléculas de ATP no procede de moléculas de naturaleza nutritiva, sino del inmenso generador solar instalado de forma casi inagotable en el firmamento.

Esta es la primera fase de todas las variantes de fotosíntesis. En el segundo estadio, mediante una serie de complejas reacciones químicas cuya eficiencia varía enormemente, la energía captada se emplea para realizar operaciones en el interior de la célula o para elaborar moléculas como las de los carbohidratos, que pueden almacenar la energía para utilizarla en el futuro. Entre los subproductos generados por las primeras variantes de fotosíntesis no se encontraba el oxígeno, así que eran reacciones que se verificaban sin dificultad en un mundo en el que ese gas no existía en forma libre. Tal vez utilizaran la energía obtenida del sol para robarle electrones al ácido sulfhídrico (de característico olor a huevos podridos) o a los átomos de hierro disueltos en los océanos primitivos.

Incluso en sus variedades más simples, la fotosíntesis supuso un tipo de suministro de energía tan nuevo como revolucionario, y la cantidad de vida presente en los mares primigenios debió de crecer hasta alcanzar un volumen equivalente al del 10 % de los niveles actuales.[14] Los procariotas que pasaron a basar su sustento en la fotosíntesis tuvieron que situarse cerca de la superficie de los océanos o en sus orillas. Muchos de ellos crearon unas estructuras similares a las del coral a las que damos el nombre de estromatolitos. Al acumularse miles de millones de organismos de

esta clase e ir amontonando capas sucesivas sobre las de sus antepasados fallecidos, estas estructuras crecieron hasta formar arrecifes en el litoral de los continentes. En algunos entornos particulares, como la bahía Shark, en las costas de Australia Occidental, todavía existen estromatolitos. Es una formación rara en nuestros días, pero es muy probable que cuando aparecieron por primera vez, hace más de 3.500 millones de años, fueran el tipo de vida más visible de la Tierra —y si añadimos que perduraron hasta hace 500 millones de años, veremos que su predominio abarca más de la mitad de la historia de nuestro planeta—. Si los extraterrestres se hubieran presentado aquí en busca de algún signo de vida, es muy posible que no hubieran hallado otra cosa que estromatolitos. Y quizá también encontremos nosotros algo parecido si llegamos a detectar vida en los planetas telúricos de otros sistemas estelares.

Al final, las nuevas formas de fotosíntesis evolucionaron hasta dar lugar a un grupo de organismos denominados «cianobacterias». El tipo de fotosíntesis que utilizaban estos seres vivos podía extraer una cantidad de energía mayor que los precedentes, ya que las materias primas que usaban eran fundamentalmente el agua y el dióxido de carbono. Conseguir que los electrones se desprendieran de las moléculas de agua resultaba más difícil que captarlos en el ácido sulfhídrico o el hierro, pero si se lograba esa hazaña se obtenía a cambio más energía, y es evidente que, para cualquier ser vivo que se desenvolviera en el agua, la fuente de energía inmediatamente disponible era muchísimo más abundante. Valiéndose de la energía que captaban de la luz solar, estos refinados mecanismos fotosintetizadores desintegraban las moléculas de agua y se apoderaban de los electrones de sus átomos de hidrógeno. Una vez hecho esto, incorporaban los electrones capturados a distintas moléculas de dióxido de carbono para formar moléculas de hidratos de carbono, que funcionan como grandes depósitos de energía. El residuo que se liberaba al medio era el oxígeno que se desprendía de las moléculas de agua descompuestas. La fórmula general con que se sintetiza esta ruta

fotosintética generadora de oxígeno es la siguiente: H_2O + CO_2 + energía solar → CH_2O (los carbohidratos actúan como despensas de energía) + O_2 (moléculas de oxígeno liberadas a la atmósfera). La fotosíntesis oxigénica era mucho más eficiente que las primeras variantes de este método, pero aun así la cantidad de energía que los microorganismos lograban extraer del sol para su sustento era poco más o menos en el 5 % de la presente en los fotones, cifra inferior a la de los paneles solares más eficientes de nuestros días. La fotosíntesis debe abonar a la entropía un elevado impuesto de residuos, tanto por el gasto de energía que se efectúa en el interior de la célula como por la energía y los materiales que el oxígeno se lleva consigo al ser liberado.

Es muy posible que el desarrollo de esta fotosíntesis generadora de oxígeno, que es el tipo de fotosíntesis que emplean todas las cianobacterias modernas, se produjera muy pronto, hace nada menos que tres mil millones de años. Esto sugieren las pruebas que indican que hubo breves períodos en que la atmósfera del planeta parecía tener un cierto «olorcillo» a oxígeno, al incrementarse los niveles de ese gas poco antes de que terminara el eón Arcaico, hace 2.500 millones de años. Sin embargo, en un primer momento todo el oxígeno desprendido debió de ser absorbido enseguida por el hierro, el ácido sulfhídrico o los átomos de hidrógeno libre, dado que el oxígeno es un ladrón de electrones y se combina muy fácilmente con cualquier elemento que tenga electrones de sobra. Por eso llamamos «oxidación» al hecho de que los átomos pierdan electrones. (Se dice que los átomos que tienen más electrones de la cuenta se hallan en estado «reducido», y las numerosas situaciones químicas que implican una combinación de ambos procesos se denominan «reacciones de óxido-reducción».) Una clarísima prueba de la evolución de las primeras cianobacterias es la desaparición hace tres mil millones de años de las rocas sedimentarias ricas en pirita (conocida también como «oro de los pobres» o «de los incautos» debido a su parecido con ese metal), pues al igual que el hierro se oxida en presencia de oxígeno libre. Sin embargo, la capacidad de

absorción de oxígeno de estos mecanismos no era ilimitada, de modo que hace unos 2.400 millones de años los niveles de oxígeno atmosféricos empezaron a aumentar a gran velocidad, pasando de una tasa inferior al 0,001 % del aire atmosférico a la actual cifra, situada probablemente en torno al 1 % o más.

La aparición de una atmósfera rica en oxígeno, mediante un proceso iniciado hace 2.500 millones de años, poco más o menos, y conocido como «Gran oxidación», transformó la biosfera. Los crecientes niveles de oxígeno alteraron la química de la biosfera y llegaron a modificar incluso el estado de los planos más superficiales de la corteza terrestre. La excepcional energía química del oxígeno libre se convirtió así en el motor de un nuevo conjunto de reacciones, responsables de la creación de muchos de los minerales existentes hoy en el planeta.[15] En las capas altas de la atmósfera, los átomos de oxígeno se combinaron para dar lugar a las moléculas triatómicas de ozono, u O_3, gracias a las cuales la superficie de la Tierra empezó a quedar protegida de las peligrosas radiaciones ultravioleta del sol, un escudo que desde entonces ha desempeñado esa función. Es posible que algunas algas, amparadas por la capa de ozono, comenzaran a colonizar por primera vez las zonas emergidas. Hasta entonces, el simple hecho de quedar bañada por la luz solar habría destruido a cualquier bacteria lo suficientemente osada como para aventurarse a salir del agua y exponerse a la radiación, de modo que los continentes del planeta Tierra debían de ser prácticamente estériles.

El incremento de la cantidad de oxígeno supuso una terrible conmoción para los organismos vivos, pues para la mayoría de ellos el oxígeno era venenoso. Esto explica que el aumento de la concentración de ese gas en la atmósfera provocara lo que la bióloga Lynn Margulis denominó en su momento un «holocausto de oxígeno». Un gran número de organismos procariotas perecieron, y los que consiguieron ponerse a salvo tuvieron que refugiarse en los

resguardados entornos de las zonas más profundas y peor oxigenadas de los océanos (de hecho, algunos tuvieron incluso que emparedarse en las rocas).

Los crecientes niveles de oxígeno estropearon los termostatos de la Tierra, pues por entonces no existía ningún mecanismo capaz de absorber el exceso de oxígeno, así que la acumulación de ese gas letal amenazó con descontrolarse. Para comprenderlo basta fijarse en que, por un lado, el oxígeno libre había comenzado a descomponer el metano atmosférico (uno de los más potentes gases de efecto invernadero), y por otro, las cianobacterias fotosintetizadoras llevaban ya algún tiempo consumiendo inmensas cantidades de otro crucial gas de ese mismo tipo: el dióxido de carbono. Por consiguiente, a medida que aumentaron los niveles de oxígeno, a principios del eón Proterozoico, el volumen de gases de efecto invernadero descendió y la Tierra se congeló, experimentando con ello el primero de los distintos períodos de glaciación global que ha vivido desde entonces. Los glaciares se extendieron por todas partes, desde los polos al ecuador, y el planeta quedó convertido en una gran bola de nieve. Esa esfera blanca reflejaba con mayor intensidad la luz del sol, lo que provocó que se enfriara todavía más e instauró un aterrador bucle de realimentación positiva. Al final, los océanos y los continentes de la Tierra quedaron en su mayor parte cubiertos de hielo. La glaciación Makganyene, o Huroniana, se prolongó por espacio de más cien millones de años, pues se inició hace 2.350 millones de años y terminó hace 2.220.

En esa ocasión, la vida se salvó por los pelos. Los organismos que sucumbían con el oxígeno como ante un agente tóxico desaparecieron o se ocultaron en las profundidades marinas. Pero lo cierto es que incluso los seres vivos capaces de lidiar con los efectos del oxígeno tuvieron que pasarlo mal en un mundo en el que los glaciares, al recubrir los continentes y los mares, bloqueaban la luz del sol necesaria para la fotosíntesis. La vida pendía de un hilo, ya

que la mayoría de las formas de vida optaron por refugiarse bajo el hielo o por acurrucarse al calor de las toberas de los volcanes suboceánicos.

Pero la Tierra no corrió la misma suerte que Marte, así que las temperaturas no descendieron lo suficiente como para imposibilitar la vida. Esto se debió a la existencia del termostato geológico animado por la tectónica de placas, cuyo mecanismo contaba ahora con la renovación y el complemento de las nuevas técnicas biológicas vinculadas con la actividad de los organismos fotosintéticos. Al impedir la fotosíntesis, los glaciares redujeron drásticamente la producción de oxígeno. Al mismo tiempo, bajo esas inmensas lenguas de hielo los volcanes submarinos continuaban inyectando dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero en el agua de los océanos. Por consiguiente, esos gases empezaron a acumularse bajo la costra helada hasta conseguir perforarla y volver a caldear la superficie terrestre. Los niveles de oxígeno se desplomaron y quedaron situados en una horquilla comprendida entre el 1 y el 2 % de la atmósfera, lo que inauguró un amplio período, de casi mil millones de años, en que la concentración de oxígeno se mantuvo razonablemente baja y el clima se caracterizó por unas temperaturas cálidas. Los antiguos termostatos planetarios parecían haberse reiniciado y adquirido la facultad de hacer frente a la presencia de los significativos niveles de oxígeno que las cianobacterias liberaban a la atmósfera.

Los eucariotas acuden al rescate

Ahora bien, ¿podía ser una solución duradera a largo plazo? ¿Se trataba de un conjunto de mecanismos que producirían una biosfera que fluctuaría entre el calor y el frío más extremos? Y en caso afirmativo, ¿cómo es que el clima permaneció relativamente estable durante mil millones de años, en un período que, iniciado hace unos dos mil millones de años, terminó hace mil millones de años? Lo que

ocurrió es que la biología vino en auxilio de los seres vivos, para lo cual desarrolló una larga serie de tipos de organismos novedosos, todos ellos capaces de suplir las carencias de los termostatos terrestres porque podían consumir el oxígeno del aire. Pero estos organismos (las primeras células eucariotas) no solo contribuyeron a estabilizar las temperaturas globales, sino que además pusieron en marcha una revolución biológica que en último término haría posible la evolución de los organismos de gran tamaño, como el suyo y el mío.

Hasta entonces, los seres vivos habían sido invariablemente procariotas unicelulares pertenecientes, bien al dominio de las arqueas, bien al de las bacterias. La aparición de un tercer dominio de formas de vida, el de Eucaria, es una extraordinaria importancia para nosotros, porque todos los organismos vivos de dimensiones considerables, incluidos los seres humanos, están formados por células eucariotas. Estas fueron las primeras células dotadas de la habilidad de utilizar sistemáticamente el oxígeno y explotar su violenta energía química mediante un proceso conocido como «respiración», que es lo que hacemos al inhalar y espirar. La respiración es lo contrario de la fotosíntesis, ya que en realidad es una manera de liberar la energía solar que las células fotosintetizadoras han logrado captar y almacenar. Si la fotosíntesis utiliza la energía de la luz del sol para convertir el dióxido de carbono y el agua en esos almacenes de energía que son los carbohidratos, dejando como producto residual el oxígeno, la respiración emplea la energía química del oxígeno para apoderarse de la energía acumulada en los carbohidratos y generar como deshecho dióxido de carbono y agua. La fórmula general de la respiración sería por tanto: CH_2O (carbohidratos) + $O_2 \rightarrow CO_2$ + H_2O + energía.

Como ya ocurrió con la irrupción de la fotosíntesis, también el hecho de que las células eucariotas desarrollaran la respiración dio lugar a una proliferación de energía, pues concedió a esos nuevos organismos la posibilidad de aprovechar la inmensa energía química

del oxígeno, pero ahora en dosis minúsculas e inocuas, lo que evitaba que acabaran reventadas. La respiración nos brinda la energía del fuego pero nos ahorra su potencia destructiva. Mediante una inteligente utilización del oxígeno, la respiración consigue extraer al menos diez veces más energía de las moléculas orgánicas que las anteriores modalidades de degradación no oxigénica de las moléculas de nutrientes.[16] Y con una mayor cantidad de energía capaz de movilizar el metabolismo, los índices de producción primaria —es decir, la producción de otros organismos vivos— debieron de incrementarse tremendamente, lo que significa que pudieron multiplicarse por diez, o tal vez incluso por mil.[17]

Las pruebas genéticas sugieren que los primeros procariotas evolucionaron hace unos 1.800 millones de años.[18] A medida que fueron proliferando y absorbiendo cantidades crecientes de oxígeno, también empezaron a bombear, como producto residual de este proceso, dióxido de carbono a la atmósfera. Y eso supuso el inicio de un nuevo termostato planetario, controlado ahora por los organismos vivos. Los eucariotas empezaron a eliminar en gran medida el oxígeno atmosférico generado por las cianobacterias. Esto podría contribuir a explicar la relativa estabilidad climática constatada durante la mayor parte del eón Proterozoico. De hecho, era tan constante que algunos paleontólogos describen el período que arranca hace aproximadamente dos mil millones de años y termina hace mil millones como «los aburridos mil millones de años».

Los biólogos modernos consideran que la distinción entre las células eucariotas y las procariotas es una de las líneas divisorias más importantes de la biología. Las células eucariotas tienen un tamaño muy superior al de la mayoría de las células procariotas. Su anchura puede ser entre diez y cien veces mayor que la de sus predecesoras, lo que significa que su volumen es también varios miles mayor. En las células eucariotas no solo se forman membranas en el perímetro de la célula, sino también en su interior, lo que permite crear compartimentos diferenciados, como las habitaciones

de una casa, de modo que en ellas pueden desarrollarse distintas actividades. Esto permite la especialización, es decir, una división interna del trabajo imposible para las procariotas. Uno de esos compartimentos, el núcleo, protege el material genético de todas las células eucariotas. De hecho, la palabra *eukaryote* procede del término que en la antigua Grecia designaba las conchas o las nueces. El contenedor del núcleo, con su función preservadora, determina que el ADN de las células eucariotas sea por regla general más estable que el de las procariotas. Y no solo puede almacenarse en cantidades superiores, también las labores de copiado resultan más sencillas, de modo que las células eucariotas suelen disponer de un mayor número de juguetes con los que entretenerse. Esta es la razón de que al final su evolución se revelara mucho más exuberante que la de sus parientes procariotas. Las eucariotas poseen también un gran número de orgánulos internos, una especie de versiones reducidas del corazón, el hígado y el cerebro de los animales. Los más importantes de esos orgánulos son las mitocondrias, porque algunos microorganismos eucariotas las utilizan para extraer la abundante energía del oxígeno, y los cloroplastos, de los que se sirven otras eucariotas para aprovechar la energía solar mediante la fotosíntesis.

Las eucariotas contaban asimismo con más facultades nuevas, como la capacidad de procesar la información y controlar su propia masa corporal —propiedades ambas que les permitían dar respuestas más complejas a los cambios en el medio—.[19] El paramecio, uno de esos organismos unicelulares eucariotas, emplea un truco muy astuto para sortear obstáculos. Si choca con alguno, retrocede, gira unos cuantos grados y vuelve a avanzar, repitiendo ese ir y venir hasta que deja de topar con un impedimento —un poco como un mal conductor que intenta aparcar en línea—. En realidad, lo que está haciendo es cartografiar su entorno para determinar cuál ha de ser su siguiente movimiento. Ese

comportamiento implica usar la información procedente del medio para orientarse en el mundo, eludir los peligros y encontrar energía y alimento.

¿Cómo evolucionaron las primeras células eucariotas? La bióloga Lynn Margulis ha mostrado que su desarrollo no fue resultado de la competencia, sino que surgieron más bien tras una suerte de fusión entre dos especies de procariotas preexistentes. Es común que dos especies diferentes colaboren entre sí mediante una interacción conocida como «simbiosis». En la actualidad, los seres humanos mantenemos relaciones simbióticas con el trigo, el arroz, las vacas, las ovejas y muchas otras variedades animales y vegetales. No obstante, Margulis se refería a un tipo de simbiosis mucho más radical, en el que un conjunto de bacterias que hasta entonces habían llevado una vida independiente (entre ellas los antepasados de las mitocondrias modernas) se establecieron en el interior de una célula del dominio de las arqueas. Margulis denominó «endosimbiosis» a este mecanismo. En un principio, la idea pareció descabellada, pues contradecía algunos de los conceptos más fundamentales de la evolución por medio de la selección natural. Aun así, en nuestros días la mayoría de los biólogos aceptan sus argumentos.

La prueba más importante en favor de la endosimbiosis es el extraño hecho de que algunos de los orgánulos internos de las células eucariotas contengan hebras de ADN propias (un ADN que es además muy distinto al del material genético que alberga el núcleo). Margulis comprendió que ciertos orgánulos, como las mitocondrias (que gestionan la energía en los animales) y los cloroplastos (responsables de la fotosíntesis en las plantas eucariotas), *parecen* haber sido en algún momento células procariotas independientes. Sigue sin estar del todo claro cómo terminaron en el interior de otras células, y algunos autores han argumentado que esa clase de fusiones tuvieron que haber sido necesariamente muy raras. De ser así, lo más probable es que debamos asumir que, si bien los organismos similares a las bacterias son muy comunes en el

universo, los seres de dimensiones considerables, como es nuestro propio caso, pueden constituir una auténtica excepción, dado que solo las eucariotas tienen la capacidad de construir organismos grandes; al menos en nuestro planeta.

Con el descubrimiento de la endosimbiosis, Margulis nos da un dato añadido sobre la historia de la vida. La evolución no es un asunto que se reduzca solo un proceso de competencia ni una constante sucesión de divergencias que dan como resultado la aparición de nuevas especies. También se observan situaciones de colaboración, simbiosis e incluso convergencia. Esto nos obliga a reconsiderar la metáfora convencional del árbol de la vida, porque aun cuando sigamos pensando que el mundo de los microorganismos se divide en tres dominios, parece que el tercero de esos dominios, el de Eucaria, no evolucionó como consecuencia de un incremento de la divergencia, sino mediante la convergencia de arquea y bacteria (lo que se parece más a la reunión de dos ramas antiguamente separadas de ese árbol).

Por si fuera poco, las células eucariotas todavía guardaban otro as en la manga, aún más extraño: el sexo. Como todas las especies, los procariotas transmiten sus genes a la descendencia. En la mayoría de los casos, las células de este grupo se limitan a escindirse en dos y a pasar sus genes a la generación siguiente mediante una reproducción asexuada. No obstante, como ya hemos visto, los genes de los procariotas también pueden desplazarse en sentido transversal, en lugar de vertical, dado que algunos trozos de ADN y de ARN pueden abandonar el barco, tomar su propio rumbo y hallar un nuevo hogar en el interior de otras células. Los microorganismos procariotas comparten sus genes de un modo muy parecido a lo que hacemos nosotros mismos cuando nos pasamos libros en una biblioteca. Sin embargo, los eucariotas tienen una forma distinta y más compleja de transferirse la información genética, pues la transmiten solo a su progenie, nunca a individuos ajenos a ella.

En los eucariotas, el material genético está encerrado en la resguardada cripta del núcleo celular. Ese material se libera únicamente bajo las más estrictas condiciones, y el proceso se atiene a un conjunto de reglas mucho menos promiscuas y más ordenadas que las de los procariotas (normas que, por cierto, afectan al modo en que evolucionan las células eucariotas). Cuando las eucariotas producen células germinales (es decir, óvulos y espermatozoides, que son los que permiten la formación de su descendencia) no se limitan *simplemente* a copiar su ADN. Primero lo mezclan, ya que intercambian parte de su material genético con otro individuo de su misma especie para que los hijos de la pareja dispongan de una selección aleatoria de genes, una de cuyas mitades procede de uno de los progenitores y la otra mitad del otro. Los mecanismos, tanto genéticos como físicos, que intervienen en esta refinada coreografía son de una complejidad exquisita. Sin embargo, lo que se consigue con ello es imprimir un nuevo giro a la evolución. Cada nueva generación tiene garantizada la inclusión de ligeras variaciones aleatorias en su información genética, pues por más que la mayoría de los genes sean idénticos (a fin de cuentas, ambos genitores pertenecen a la misma especie), una minúscula porción presenta siempre leves diferencias. De este modo, al poder escoger entre un conjunto de posibilidades más diverso, la evolución dispone de más opciones. Esta es la razón de que tengamos la impresión de que en los últimos mil millones de años la evolución ha pisado el acelerador. Esos mil millones de años aburridos del eón Proterozoico allanaron el camino de una época muchísimo más emocionante: la del eón Fanerozoico, es decir, la era de la macrobiología.

Capítulo 6

LA MACROBIOLOGÍA Y LA BIOSFERA

> «Quizá los animales sean la guinda de la evolución, pero el pastel son las bacterias.»
>
> Andrew Knoll, *Life on a youg planet*

LA MACROBIOLOGÍA

La vida microscópica dominó la biosfera durante 3.500 millones de años, y todavía continúa rigiendo buena parte de ese ámbito. Al pasar de Luca a los primeros especímenes macroscópicos, es decir, a los animales o metazoos primitivos, se invirtieron tres mil millones de años. Ese vasto lapso de tiempo nos indica que el desarrollo de los organismos pluricelulares fue mucho más complicado que el proceso que dio lugar a los procariotas. Y esto sugiere a su vez que si existe una gran cantidad de vida en el universo, los metazoos han de ser forzosamente una realidad poco frecuente. Los metazoos introducen en el mundo de los organismos vivos un tipo de complejidad que no solo es nuevo, sino que pertenece a un nivel superior.

Se requieren muchos mecanismos moleculares para poder plantearse siquiera la eventualidad de construir un organismo multicelular. Es preciso disponer de fórmulas fiables que permitan no solo la unión de millones de células, sino que esa agrupación genere estructuras concretas; son imprescindibles canales de comunicación entre las células; hay que contar con nuevas formas de entrenar a las células para que desempeñen un determinado papel; y hay que

tener también métodos innovadores que, además de gestionar y compartir la información y la energía, sean capaces de distribuir ambas cosas entre una población compuesta por miles de millones de células. Y es igualmente necesario dotarse de una maquinaria capaz de elaborar alas, ojos, garras, corazones, antenas, tentáculos, aletas, caparazones, esqueletos... y cerebros, dado que los grandes organismos asimilan, procesan y responden a un volumen de información muy superior al que manejan los de pequeño tamaño. Eso supone una enorme cantidad de nuevas infraestructuras.

Tuvo que transcurrir mucho tiempo para que se desarrollaran todos esos dispositivos, así que para fabricar metazoos el planeta tuvo que dotarse de un nuevo requisito Ricitos de Oro: la estabilidad. Por sí solas, las condiciones favorables a la vida no son suficientes. Es necesario que esas condiciones persistan durante largos períodos de tiempo para que la vida pueda continuar evolucionando y experimentando. En este sentido, la presencia de un sol estable es de gran ayuda, y el nuestro cumple a la perfección esa exigencia. Desde el punto de vista estelar, el sol es un ciudadano fiable, alguien con pocas probabilidades de seguir un comportamiento impredecible en exceso. Las órbitas planetarias erráticas, por el contrario, conllevan drásticos vuelcos climáticos, así que habitar un planeta cuya órbita sea estable también es muy positivo. Y también en este aspecto la Tierra cumple su parte. Además, el tamaño insólitamente grande de nuestro satélite contribuye a estabilizar tanto la órbita como la inclinación del eje de rotación terrestre. Y como hemos visto, la tectónica de placas, la erosión, y más tarde la propia vida, permitieron que actuaran los termostatos necesarios para impedir que la superficie de la Tierra se viera expuesta a unas oscilaciones de temperatura demasiado grandes.

Muchas cosas podrían haber salido mal. Hubiera podido explotar una supernova en algún sistema estelar próximo. O podríamos haber sufrido una colisión fatal con otro planeta. De un modo u otro, la Tierra ha conseguido sortear todos esos peligros y conservar durante

más de tres mil millones de años unas condiciones idóneas para el desarrollo de la vida. Ese dilatado período de tiempo bastó para propiciar el surgimiento y la evolución de los grandes organismos. Y cuando hablamos de organismos «grandes» nos referimos a realmente enormes. Para una bacteria, los seres humanos somos lo que el Burj Khalifa de Dubai, con sus 830 metros de altura, para cualquier hormiga que se cuele entre los zapatos del conserje.

Una vez en escena, los seres vivos de gran tamaño comenzaron a transformar la biosfera tanto como los microorganismos anteriores, pero sus efectos no fueron los mismos. Los metazoos colonizaron los continentes y los modificaron. Las plantas de porte fijaron las rocas al suelo, aceleraron la erosión y convirtieron las polvorientas superficies e inmensos pedregales de la Tierra primitiva, con su cenefa litoral de estromatolitos, en los lujuriantes y exóticos jardines, los espesos bosques y las pobladas sabanas que la han revestido a lo largo de los últimos quinientos millones de años. Y al bombear oxígeno a la atmósfera, las plantas verdes que prosperaron fuera del agua transformaron el aire. Hace aproximadamente cuatrocientos millones de años, la Tierra empezó a habituarse a una nueva situación atmosférica caracterizada por sus elevados niveles de oxígeno (situados ahora por encima del 15 % de la capa aérea del planeta, cuando antes lo normal había sido un contenido inferior al 5 %) y su reducida proporción de dióxido de carbono (de pocas partes por millón, mientras que era habitual registrar cifras de varios miles de partes por millón). Los animales empezaron a vagabundear por el planeta y a utilizar los nuevos nichos ecológicos que habían creado las plantas de gran tamaño, mientras que los hongos y las bacterias se afanaban en limpiar, desmenuzar y reciclar los restos de los organismos muertos. Los metazoos también transformaron los mares y los llenaron de extrañas criaturas jamás vistas hasta entonces, de las gambas a los caballitos de mar, pasando por los pulpos y las ballenas azules.

Los artilugios moleculares que hicieron posible la aparición de los organismos de gran tamaño

En los últimos mil millones de años, las innovaciones celulares más importantes no se produjeron en las células mismas (en ese aspecto, los procariotas ya habían hecho la mayor parte del trabajo), sino en las cambiantes relaciones estructurales que se daban entre ellas. Los primeros organismos pluricelulares se formaron a partir de agrupaciones de células unidas por vínculos débiles, como ocurre por ejemplo en los miles de millones de células de un estromatolito. En realidad, se trataba más de rebaños que de verdaderos organismos. De hecho, muchas bacterias tienen efectivamente el comportamiento de un tropel, lo que equivale a decir que su sistema de comunicación es rudimentario. En la práctica, esto significa que las redes computacionales presentes en el interior de cada célula están asociadas a un sistema de conexiones integrado por un gran número de células diferentes.

Es posible que algunos de los primeros metazoos lo fueran solo a tiempo parcial, como sucede con los actuales mohos mucilaginosos. El *Dictyostelium* es una ameba, y durante buena parte de su existencia las células que lo componen llevan vidas independientes. Sin embargo, cuando escasea la comida, miles de células se reúnen creando así una especie de babosa, una criatura de notable tamaño capaz de desplazarse en busca de alimento. Además, ese plasmodio puede hacer cosas que resultan imposibles para las células individuales, como recorrer largas distancias en busca de luz y calor. A medida que se desplazan, las células de esa formación mucosa pueden transformarse y desempeñar distintos roles. De este modo, unas actúan a modo de esporas y otras constituyen su tallo o pedículo. La conducta del *Dictyostelium* nos permite comprender varias circunstancias relevantes. En primer lugar, que la vida pluricelular se ha desarrollado muchas veces y continúa evolucionando en la actualidad, al menos entre algunos grupos de organismos. En segundo lugar, que la condición de los seres

multicelulares, como la de la vida en general, incluye una zona gris en la que hay organismos fronterizos difíciles de clasificar.[1] Y en tercer lugar, que su reunión en formaciones pluricelulares multiplica la capacidad de cálculo computacional de las células aisladas y les permite incrementar la eficacia con la que gestionan la información que les llega del entorno.

Las células que componen los organismos plenamente multicelulares están tan especializadas y son tan interdependientes que ya no podrían sobrevivir por sí solas. La situación de los seres auténticamente pluricelulares es en realidad una forma de simbiosis llevada al extremo. No obstante, el hecho de que la mayoría de las células de los metazoos sean genéticamente idénticas facilita la colaboración. Están todas emparentadas, lo que significa que cada una de ellas trabaja para conservar la totalidad del organismo, y para ello pueden llegar a sacrificar su propia vida por el bien del conjunto. Lo cierto es que las células suelen autodestruirse, como los pilotos kamikazes, si detectan que han dejado de funcionar correctamente o de prestar un servicio necesario (en un proceso que los biólogos denominan «apoptosis»). Hoy mismo, en su cuerpo, cincuenta mil millones de células se suicidarán mediante ese procedimiento.

Para los organismos multicelulares, el intercambio de información es tan crucial como para las sociedades modernas. Gran parte de la comunicación intercelular se lleva a cabo mediante el equivalente celular de un servicio de correos. Las moléculas postales se cuelan a través de las membranas de las células individuales o pedalean entre ellas con su particular carga de alimentos, avisos, datos y órdenes. En 1998, cuando se logró secuenciar el genoma del primer metazoo, se comprendió claramente qué parte de esa estructura estaba consagrada a la colaboración. El organismo estudiado en esa ocasión fue un gusano denominado *Caenorhabditis elegans*, cuyo sistema nervioso posee exactamente 302 neuronas. Se descubrió que cerca

del 90 % de sus 18.891 genes se halla ausente en los procariotas unicelulares, debido a que la tarea de esos genes consiste en contribuir a la cooperación intercelular.[2]

Si las células de un organismo de gran tamaño trabajan bien de manera concertada se debe a que comparten los mismos genes, y a su vez, el motivo de que desempeñen papeles diferentes es que las distintas células tienen activados unos genes que también son desiguales. Cuando la solitaria célula de un óvulo fertilizado se divide y multiplica, las nuevas células que van apareciendo proceden a activar distintas partes de su genoma común, según el lugar que ocupen en el embrión en desarrollo. Son varios los genes que determinan las estructuras que deberán ponerse en marcha y el rol que les tocará desempeñar en el organismo. Quienes se encargan de manejar este notable proceso de desarrollo son los integrantes de un reducido grupo de genes conocidos con el nombre de «herramientas genéticas», como los aproximadamente doscientos genes *Hox*.[3] Las herramientas genéticas son un poco como los jefes de obra. Si los genes comunes se dedican a los trabajos de construcción comunes y se centran en fabricar determinada proteína o en activar una enzima en particular, los instrumentos de edición génica deciden cuándo y dónde deben presentarse los operarios moleculares (y qué tipo de obrero químico se necesita), valiéndose para ello de un conjunto de planes arquitectónicos almacenados en el ADN de la célula. Pueden decir cosas del tipo: «Vale, los de allí tenéis que empezar a formar una pierna» o «No, no: eres una célula ósea, no una neurona». Así es como se fabrican las células de los músculos, los nervios, la piel, los huesos y demás, hasta completar los doscientos y pico tipos diferentes que conforman el cuerpo humano.

Las herramientas genéticas son muy parecidas en las distintas especies, lo que sugiere que forman parte de la más antigua gama de accesorios de los organismos de gran tamaño. Lo que distingue a las cucarachas de las cacatúas no son las herramientas genéticas en sí mismas, sino las distintas formas en que estas activan los genes.

De este modo, lo que en una especie es una pata en otra especie se convierte en un ala, y la criatura que inicia su andadura vital con aspecto de renacuajo puede terminar siendo una ballena azul. Si un conjunto de herramientas genéticas confunde el orden de activación de los genes que controla pueden surgir monstruos, como ocurre por ejemplo con las moscas de la fruta a las que les salen patas en la cabeza. Los diferentes planes arquitectónicos que utilizan las herramientas genéticas contribuyen a explicar la notable variedad que presentan hoy los organismos de los metazoos.

El despegue de los seres vivos de gran tamaño: los períodos ediacárico y cámbrico

Hace solo unos mil millones de años que los metazoos empezaron a prosperar. Lo más probable es que los primeros organismos de este tipo fueran unas algas con capacidad fotosintética que acabaron formando estructuras similares a las de las laminariales. Sin embargo, al final del eón Proterozoico, es decir, hace unos seiscientos millones de años, empezó la época dorada de los seres vivos de gran tamaño, cuando millones de especies de metazoos iniciaron la exploración de los numerosos hábitats nuevos y los no menos abundantes y nuevos modos de vida que estrenaban su condición de individuos pluricelulares.

Los tremendos vuelcos que experimentó el clima a finales del eón Proterozoico propiciaron el auge de los organismos de gran tamaño. Es probable que se produjeran otros dos episodios de glaciación global, provocados a su vez por el aumento de los niveles de oxígeno. La fase de congelación que se inició hace cerca de setecientos millones de años fue tan significativa que en 1990 los geólogos añadieron un nuevo período a la cronología terrestre: el criogénico. Esta división de la escala temporal geológica arrancó hace 720 millones de años y duró 85 millones de años. Los continentes y los océanos quedaron cubiertos por glaciares de varios

kilómetros de profundidad. Es posible que las temperaturas de la superficie del planeta cayeran hasta los cincuenta grados Celsius bajo cero, con lo que la fotosíntesis quedaría poco menos que detenida. Una vez más, el destino del conjunto de los seres vivos volvía a pender de un hilo.

¿Por qué se congeló la Tierra? Quizá se debiera a que la proliferación de las algas en tierra firme estuviera consumiendo enormes volúmenes de dióxido de carbono,[4] pero es posible que las transformaciones que estaba experimentando la configuración de los continentes también tuvieran algo que ver. Desde principios del eón Proterozoico, las placas tectónicas habían estado agrupándose periódicamente para formar inmensos supercontinentes. El supercontinente de Columbia alcanzó su máximo tamaño hace unos 1.800 millones de años.[5] Hace mil millones de años, la mayor parte de los continentes se encontraban fusionados en otro supercontinente, conocido hoy con el nombre de Rodinia. La fractura de la masa continental de Rodinia incrementó la complejidad de la geografía global y aceleró la acción erosiva de los elementos, lo que pudo haber secuestrado otra gran cantidad de dióxido de carbono. Y es posible que también estuvieran actuando otros procesos más violentos. Otra de las posibilidades es un súbito cambio en el eje de rotación de la Tierra, ya que eso habría alterado la posición que ocupaba el conjunto de los continentes en relación con los polos. Esta clase de acontecimientos reciben el nombre de «desplazamientos polares verdaderos», y en los últimos tres mil millones de años se han producido al menos en treinta ocasiones. Un ataque de hipo geológico de semejante magnitud podría haberse debido al repentino deslizamiento de inmensas masas de magma fundido en el interior de la Tierra, o tal vez la causa esté relacionada con el impacto de algún asteroide.[6]

Fuera cual fuese el motivo, lo cierto es que esos bruscos cambios debieron de forzar el ritmo al que evolucionaba la vida. Bajo la costra de hielo, los organismos que consiguieron sobrevivir volvieron a guarecerse en torno a las grietas de la corteza terrestre por las

que brotaba magma caliente. En estos campos de refugiados biológicos la evolución encontró la forma de explorar extrañas vías para proseguir su andadura, puesto que los nuevos genes de los eucariotas tenían la facultad de poder propagarse con rapidez en las pequeñas poblaciones aisladas. De hecho, estos mundos insólitos debieron de asistir a algunos de los primeros experimentos tendentes a crear seres pluricelulares.

Este período de intenso frío terminó hace unos 635 millones de años y su fin fue muy brusco. Los gases de efecto invernadero que exhalaban los volcanes se acumularon bajo el hielo hasta que lo rompieron y se liberaron en la atmósfera con terribles explosiones. Los niveles de dióxido de carbono crecieron entonces vertiginosamente, y al mismo tiempo el porcentaje de oxígeno del aire se desplomó hasta alcanzar proporciones muy inferiores a las actuales. Las temperaturas se dispararon, el hielo se derritió, y la biosfera quedó transformada. De este modo, las innovaciones biológicas que habían posibilitado la aparición de la vida multicelular —muchas de las cuales habían eclosionado en el gélido y oscuro universo del período criogénico— se vieron liberadas en ese mundo, ahora recién caldeado.

Las más antiguas pruebas inequívocas de la existencia de grandes cantidades de organismos pluricelulares proceden del período Ediacárico, que se inició hace aproximadamente 635 millones de años y terminó hace unos 540 millones de años. Esta es por tanto la primera vez en que podemos observar la presencia de los tres grupos de grandes organismos con los que estamos familiarizados: las plantas, que dependen de la fotosíntesis y que por ello mismo suelen poder permanecer fijas y dedicarse a absorber la energía solar; los hongos, que se alimentan de la materia orgánica en descomposición; y los animales, que deben mantenerse alerta y gozar de una notable movilidad porque su supervivencia depende de la captura y posterior ingesta de otros organismos. Al aparecer una inmensa cantidad de organismos caracterizados por el hecho de obtener su energía del consumo de otros seres vivos, la biosfera no

solo ganó en complejidad, sino que vio crecer también su diversidad y su ordenación jerárquica, pues la energía procedente del sol recorría ahora varios niveles tróficos, pasando de las plantas a los animales y a los hongos. Los animales como nosotros, los seres humanos, conseguimos una energía de segunda mano, puesto que la que utilizamos proviene en primer término de las plantas (y cuando llega a nuestro organismo una gran parte se ha perdido por el camino). Los ecologistas hablan de «cadena trófica» o alimentaria: una especie de larga cola de consumidores de energía al frente de la cual se encuentran las plantas, seguidas de los herbívoros (es decir, de las criaturas que consumen vegetales), los carnívoros (que consumen herbívoros) y por último los hongos, que cierran la fila porque se dan un festín con los organismos muertos. La totalidad del proceso supone un deleite para la entropía, ya que recauda impuestos por los desperdicios que se producen en todos esos pasos. En cada uno de los niveles tróficos se pierde aproximadamente el 90 % de la energía captada mediante la fotosíntesis, lo que significa que los últimos eslabones de la cadena alimentaria disponen de una cantidad de energía muy inferior a la de los primeros. A eso se debe que sobre la faz de la Tierra haya muchos menos animales que plantas y menos carnívoros que herbívoros. Sin embargo, los hongos salen bien parados en todos los casos, pues reciclan los cadáveres de cualquier clase de organismo.

Es probable que los seres pluricelulares más primitivos perteneciesen al reino vegetal, dado que en el interior de sus células había cloroplastos, lo cual les permitía efectuar la fotosíntesis. Los animales multicelulares evolucionaron en una fecha muy posterior, por la doble razón de que en la posición retrasada que ocupan en la cadena trófica la cantidad de energía disponible es más escasa y de que necesitan más energía para poder buscar o dar caza a los organismos de que se nutren. Las primeras pruebas de la existencia de «animales» pluricelulares se encuentran en los océanos del período Ediacárico.

Este período debe su nombre a las colinas de Ediacara, en la Australia Meridional, porque en la década de 1940 se encontraron en ellas los primeros fósiles de esa época. Hasta la fecha, los paleontólogos han descubierto al menos cien géneros de la biota* de Ediacara. En un principio, el hallazgo provocó una notable sorpresa, pues, durante más de un siglo los biólogos habían supuesto que los más primitivos organismos de gran tamaño habían aparecido en el período Cámbrico, en una horquilla temporal iniciada hace 540 millones de años y terminada hace 490 millones de años. Los científicos ignoraban la existencia de las criaturas del período Ediacárico porque la mayoría de ellos poseía un cuerpo formado por tejidos blandos, similar al de las esponjas, las medusas o las anémonas de mar de nuestros días, lo que dificulta que se fosilicen. Y si en la actualidad tenemos noticia de que vivieron en ese período es debido a los rastros y túneles que dejaron tras de sí al avanzar, culebrear y excavar trabajosamente en el lodo de los mares ediacáricos. Es probable que los primeros cnidarios y ctenóforos (similares a las medusas, aunque en esos grupos se incluyan también otros tipos de animales) nadaran precisamente en los océanos del período Ediacárico. Revisten una gran importancia para nosotros porque fueron los primeros organismos grandes en tener células nerviosas, aunque todavía no las tuvieran concentradas en un sistema nervioso unitario ni en un cerebro, sino repartidas por todo el cuerpo, como en los sistemas nerviosos de los modernos invertebrados.

Los biólogos describen la súbita aparición de un elevado número de especies con la expresión «radiación adaptativa». Es una idea fundamental. Acababa de encontrarse un nuevo dispositivo biológico (el vinculado con la condición pluricelular), y poco después comenzaban a aparecer grandes cantidades de distintos linajes evolutivos dispuestos a explorar las posibilidades del recién inventado artilugio. Como suele ocurrir con todos los prototipos (pensemos por ejemplo en los primeros carruajes sin caballos, impulsados por motores de combustión interna), la mayoría de los

modelos iniciales no duraron mucho. En nuestros días, podemos identificar pocos seres vivos como descendientes de las especies ediacáricas, pues en la mayoría de los casos desaparecieron hace aproximadamente 550 millones de años. Si por casualidad hubiera alguien que sintiera la tentación de considerar que este hecho constituye la señal inequívoca de un fracaso evolutivo, recordemos que los seres humanos llevamos apenas doscientos mil años hollando la superficie del planeta.

El período Ediacárico fue una especie de prueba para los organismos multicelulares. El Cámbrico, o Cambriano, que es la era siguiente al Ediacárico, señala el inicio de lo que los biólogos denominan el eón Fanerozoico, es decir, el de la vida de buen tamaño, que es aún el de nuestros días. En el período Cámbrico, los metazoos vivieron una segunda radiación adaptativa.

Un científico inglés de mediados del siglo XIX llamado Adam Sedgwick fue el primero en identifica los fósiles cambrianos. De todos los estratos que mostraban pruebas de la existencia de vida, los cámbricos eran los más antiguos de cuantos se conocían en su época. Contenían un gran número de fósiles de animales grandes, sobre todo de trilobites. Los trilobites pertenecían al filo de los artrópodos, unos organismos modulares que tienen el esqueleto por la parte exterior del cuerpo, como ocurre con los actuales insectos y crustáceos. El hecho de que muchos de los seres vivos del Cámbrico poseyeran esqueletos o conchas fue lo que determinó que sus fósiles aparecieran tan bien preservados. Para los paleontólogos decimonónicos, la vida parecía haber surgido con toda su pujanza y ya plenamente formada, para satisfacción de quienes creían en un dios creador. Hoy sabemos que, en el Cámbrico, la vida ya llevaba pululando por el planeta 3.500 millones de años, pero en el siglo XIX resultaba difícil encontrar pruebas de ello. Esto viene a indicar que el Cámbrico no es el inicio de la vida, sino la exuberante radiación adaptativa de las formas de vida pluricelulares.

Los diseños del período Cámbrico tuvieron más éxito que los del Ediacárico, como si la vida hubiera conseguido resolver unos cuantos fallos técnicos relevantes. Uno de los mejores trucos de cuantos resultaron eficaces en esa era fue el de la modularidad, cuyo principio reside en la unión de dos o más módulos corporales muy parecidos. De este modo se puede formar, por ejemplo, una criatura parecida a un gusano. Después las herramientas genéticas comienzan a modificar los distintos módulos para que algunos de ellos fabriquen patas o alas, mientras otros se transforman en una cabeza provista de boca, antenas o quizá un cerebro. Incluso nosotros, los seres humanos, somos modulares, aunque nuestros módulos están tan especializados que es difícil apreciar los elementos que los hacen semejantes.

Los bocetos cámbricos tuvieron tanto éxito que todos los grandes grupos (o filos) de organismos de tamaño apreciable que existen en la actualidad echaron a andar en ese período. Y en su mayor parte aparecieron en el asombroso lapso de diez millones de años que se inició hace 530 millones de años. En este intervalo de tiempo (apenas una fracción de segundo para un paleontólogo) se concentra la que quizá sea la franja de innovación biológica más acelerada de los últimos seiscientos millones de años.[7]

Entre las especies del Cámbrico figuran los primeros cordados, o vertebrados. Los cordados constituyen el vasto filo animal al que nosotros mismos pertenecemos. Los vertebrados son en realidad una especie de tubos. Todos poseen una espina dorsal, un extremo anterior (en el que está la boca) y otro posterior (en el que se encuentra el ano). También cuentan con un rudimentario sistema nervioso. Los primeros vertebrados ni siquiera tenían ese globo en el que se concentran las neuronas y al que llamamos «cerebro», pero disponían ya de un sistema nervioso provisto de centenares o miles de nervios interconectados con el que podían procesar una enorme cantidad de información —una información que, tras ser transmitida en primer término por las células sensoriales, era transferida ya en forma de decisiones a otros órganos para que estos llevaran a cabo

las acciones pertinentes—. Incluso el sistema nervioso del más simple de los metazoos es capaz de interpretar y de responder a un volumen de información muy superior al que procesan los organismos unicelulares. Por todo ello, el Cámbrico señala también el inicio de una era en la que el tratamiento de la información no solo se vuelve más complejo sino que adquiere también una mayor importancia. Los actuales invertebrados marinos que conocemos con el nombre de «peces lanceta» (que tienen un sistema nervioso pero no un cerebro propiamente dicho) podrían guardar cierto parecido con nuestros más antiguos antepasados vertebrados.

La inestabilidad del clima podría explicar el notable y rápido ritmo que siguió la evolución a lo largo del período Cambriano. Los niveles de oxígeno volvieron a elevarse y eso puso en circulación parte de la energía necesaria para el surgimiento de los organismos multicelulares. Sin embargo, las tasas de dióxido de carbono crecieron a una velocidad muy superior, hasta alcanzar proporciones mucho más elevadas que las actuales. El mundo quedó transformado en un ecosistema cálido y húmedo, como el de un invernadero. Fueran cuales fuesen exactamente los cambios que se registraran, los bruscos y violentos vuelcos climáticos y geológicos debieron de imprimir mayor velocidad a la evolución, provocar la extinción de numerosas especies y forzar el surgimiento y la posterior transformación de muchos nuevos tipos de organismos de gran tamaño.

Los altibajos de la evolución: extinciones masivas y montañas rusas

Tal como sucede a los exploradores que atraviesan una barrera montañosa para adentrarse en un territorio desconocido, la invención de los organismos pluricelulares abrió una larga serie de posibilidades nuevas a la vida. Los metazoos tantearon todas esas perspectivas, lo que dio lugar a una multiplicidad de radiaciones adaptativas. Esas nuevas formas de vida transformaron la corteza

terrestre, pues la acumulación de los esqueletos y las conchas de los seres vivos, al estar hechos de carbonato cálcico, formaron gruesas capas de creta (que es lo que confiere su característico color blanco a los acantilados de Dover, por ejemplo). Las plantas y los animales de gran tamaño emigraron a tierra firme, lo que a su vez aceleró los procesos de desgaste, erosión y desmenuzamiento de las rocas, propiciando así la aparición de los primeros suelos verdaderamente fértiles del planeta. Y en último término, la clorofila presente en las células vegetales cubrió el paisaje de una densa capa de verdor.

Estos cambios no se produjeron tal como Darwin y los científicos de su generación habían imaginado, pues en este caso la evolución no hizo surgir las suaves y majestuosas formas previstas. Todo lo contrario, ya que la historia de los seres vivos de grandes dimensiones parecía haber montado en una impredecible y peligrosa montaña rusa. Una sucesión de impactos de asteroides, súbitas convulsiones de las entrañas de la Tierra, modificaciones de la atmósfera del planeta y gigantescas erupciones volcánicas precipitó a la evolución por una serie de pendientes tan inéditas como inesperadas. Como argumentaron Niles Eldredge y Stephen Jay Gould en un célebre artículo publicado en 1972, la evolución es de carácter «sincopado» o «interrumpido».[8] Según explica el tópico de la vida de un soldado en campaña, la evolución durante el Fanerozoico fue una larga secuencia de períodos de inactividad, interrumpidos por momentos de terror y violencia potencialmente letal. Esa violencia se presenta de forma particularmente acusada en los períodos marcados por procesos de extinción generalizados.

De nuevo nos encontramos con la acción combinada del azar y la necesidad. En un instante temporal cualquiera, siempre existe la posibilidad, al menos teóricamente, de que se produzcan muchas mezclas de especies diferentes. El surgimiento de acontecimientos aleatorios es lo que determina qué especies, de todo ese abanico factible, se convierten en realidad. En los períodos marcados por uno o más episodios de extinción masiva se desvanecen de un plumazo grupos de especies enteros, y además de forma en apariencia

aleatoria. Como ocurre en las guerras de los seres humanos, los procesos de extinción masiva siegan una horrorosa cantidad de vidas. En el Cámbrico, esas fases ejercieron un impacto muy intenso en las ramas más especializadas, pues los seres vivos que llevan su especialización al extremo, como los koalas modernos, tienen muy escaso margen de maniobra en períodos de rápido cambio. Las extinciones generalizadas incidieron también con mucha fuerza en los organismos más grandes, ya que no solo precisan mayores volúmenes de alimento sino que se reproducen con demasiada lentitud, lo que les impide seguir el veloz ritmo de las transformaciones. Los procesos de extinción masiva barajan el mazo de las cartas genéticas, crean nuevos nichos para el desarrollo de los organismos que logran sobrevivir y ponen en marcha nuevos experimentos evolutivos. A una fase de extinción masiva le sigue siempre otra de radiación adaptativa, es decir, un período presidido por una rápida serie de tanteos que inundan de productos biológicos nuevos el mercado de masas de la cambiante biosfera. En su mayor parte, los experimentos más estrafalarios se desvanecen en poco tiempo, dejando sobre el escenario solo a los más exitosos.

Las primeras extinciones masivas se produjeron hace mucho, nada menos que en el eón Arcaico. Es casi seguro que el período de la Gran oxigenación (llamado también «holocausto de oxígeno»), hace 2.500 millones de años, acabó con muchos organismos bacterianos porque para ellos el oxígeno era una sustancia tóxica. Es posible que esa fuera la mayor extinción masiva jamás registrada. A finales del eón Proterozoico, durante los episodios de glaciación global sufridos en la Tierra, también perecieron numerosos grupos de especies, y sabemos que en las postrimerías del período Ediacárico desaparecieron otras muchas. Desde entonces hemos tenido noticia de al menos cinco procesos de extinción masiva que se llevaron por delante más de la mitad del total de tipos de especies existentes.

La explosión cámbrica terminó con una serie de acontecimientos de extinción masiva que se iniciaron hace aproximadamente 485 millones de años. Un gran número de especies de trilobites saltaron por la borda, y lo mismo le ocurrió a la mayor parte de los organismos cámbricos de aspecto más extraño, cuyos fósiles se han encontrado en el esquisto de Burgess, en Canadá, y en la región china de Chengjiang.[9] Hace 450 millones de años, el período Ordovícico también culminó en un episodio de extinción masiva que acabó con la vida del 60 % de los géneros biológicos.

La mayor de todas las extinciones generalizadas se produjo a finales del período Pérmico, hace 248 millones de años. En esta ocasión se esfumó más del 80 % de los géneros existentes, entre ellos el último de los trilobites. Las causas exactas de esta extinción masiva siguen sin comprenderse por completo. Tal vez se debiera al ascenso de grandes volúmenes de magma y que el desencadenamiento de varias erupciones titánicas perforaran la corteza terrestre y lanzaran al aire cenizas suficientes como para bloquear la fotosíntesis. Hoy en día pueden encontrarse pruebas de este episodio en las vastas regiones volcánicas de la estepa rusa conocidas como «escaleras siberianas». Las erupciones inyectaron enormes cantidades de dióxido de carbono en la atmósfera, así que, en cuanto el polvo se asentó, los niveles de dióxido de carbono crecieron vertiginosamente, la concentración de oxígeno cayó y los océanos se volvieron más cálidos. Cuando la Tierra eructa, la biosfera tiembla. Según algunas estimaciones, la temperatura de los mares pudo alcanzar nada menos que los 38 grados Celsius, lo que bastó para matar a la mayoría de los organismos marinos y frenar casi toda la fotosíntesis oceánica. El aumento de la temperatura del mar hace que el agua contenga una menor proporción de oxígeno y que por consiguiente no pueda sostener la misma cantidad de formas de vida que un océano frío. Y no olvidemos que en las profundidades marinas el deshielo de las grandes bolas de metano congelado que denominamos «clatratos» pudo provocar la liberación de inmensas burbujas de ese gas. Se trató, por tanto, de una

«extinción generalizada causada por el efecto invernadero»,[10] ya que la mortandad no se debió al frío, sino al calor. En un mundo recalentado al máximo como consecuencia del efecto invernadero, los seres vivos de gran tamaño solo sobrevivieron en los entornos polares, obviamente menos ardientes, de los extremos septentrional y meridional del inmenso supercontinente de Pangea.

Los procesos que tiñeron de verde la tierra y oxigenaron la atmósfera

Tras las bambalinas del violento y cambiante escenario del Fanerozoico primitivo se estaba organizando en realidad una biosfera completamente nueva. La proliferación de plantas, hongos y animales por las tierras emergidas transformó la superficie del planeta. De particular importancia fue la difusión por los continentes de las plantas con capacidad fotosintética, pues esa masa vegetal consumía enormes volúmenes de dióxido de carbono y liberaba al mismo tiempo cantidades no menores de oxígeno. Ese proceso acabó reiniciando los termostatos de la biosfera y dio lugar a un nuevo régimen climático caracterizado por la presencia de unos niveles de oxígeno más elevados que nunca, acompañados de unas tasas de dióxido de carbono igualmente insólitas. A grandes rasgos, ese régimen se ha mantenido hasta la fecha.

La colonización de los continentes resultó sumamente difícil, fue como instalarse en un planeta desconocido. La vida llevaba tres mil millones de años evolucionando y floreciendo en el mar. Hasta entonces todas las células se habían desarrollado en un baño de agua salada. Los seres vivos flotaban en ese líquido, extraían de él los gases y las sustancias químicas que necesitaban y se alimentaban atrapando a otros organismos inmersos en el mismo medio. Al alejarse del agua tuvieron que dotarse de unos sistemas de soporte vital tan complejos como cualquier traje espacial. Tuvieron que cubrirse con una piel resistente y capaz de retener el agua para evitar que sus organismos terminaran secándose. Ahora

bien, esa epidermis tenía que ser al mismo tiempo lo suficientemente permeable como para permitir el paso del dióxido de carbono o el oxígeno. Esto les obligó a conseguir un delicado equilibrio. Las hojas de las plantas logran satisfacer estas dos exigencias opuestas de la estanqueidad y la permeabilidad gracias a unos poros diminutos denominados «estomas» que permiten que el dióxido de carbono penetre en el interior del organismo vegetal y que el exceso de agua se evapore. El tamaño y el número de estomas de cada planta cambia en función de la temperatura ambiente, de la humedad reinante y de los niveles de dióxido de carbono del medio.

Pero ¿cómo lograron los seres vivos reproducirse fuera del agua? ¿Cómo protegían sus huevos, o a sus crías, de la terrible amenaza de la desecación? El agua también les ofrecía sustentación, dado que les permitía flotar, y no puede decirse que en tierra se flote demasiado. Para los insectos más pequeños, como las pulgas, esto carecía de importancia. Eran lo suficientemente ligeros para poder despreocuparse de la gravedad, por eso una pulga puede tirarse de un acantilado sin temor. Pero en el caso de los organismos de gran tamaño, la gravedad sí representaba una dificultad añadida. Si querían mantenerse erguidos tendrían que apuntalarse en vigas de madera o hueso. Y una vez en pie, no les quedaba más remedio que crear una compleja red de tuberías para que los líquidos pudieran circular adecuadamente y llegar, venciendo la gravedad, a todas sus células corporales. Las plantas hacen circular los líquidos mediante raíces y canales internos, aprovechando la propiedad que hace posible que el agua trepe por cualquier pasadizo estrecho gracias a la capilaridad. Por su parte, los animales desarrollaron unas bombas especiales (también conocidas con el nombre de corazones) con las que no solo consiguieron desplazar los líquidos y los nutrientes, sino también eliminar las toxinas.

Los metazoos no empezaron a colonizar en serio la tierra firme hasta después de la gran extinción de finales del Ordovícico, hace 450 millones de años. Fue entonces cuando un puñado de intrépidos

grupos de plantas y animales se aventuraron a salir por primera vez de los océanos y a internarse con cautela en los continentes (animados tal vez por la inyección de energía que les había supuesto la existencia de unos niveles de oxígeno en claro crecimiento).

Las primeras plantas vasculares, provistas de tejidos capaces de facilitar la circulación de líquidos y nutrientes, aparecieron en tierra firme hace unos 430 millones de años. Los hongos y los animales no tardaron en seguir su ejemplo. Es posible que, junto a las primeras plantas vasculares, y al mismo tiempo que ellas, prosperaran también fuera del agua algunos artrópodos simples parecidos a los escorpiones. Desde luego, los anfibios primitivos ya recorrían las tierras emergidas hace cuatrocientos millones de años, pues de esa fecha son las huellas fósiles halladas en Irlanda y Polonia correspondientes a unos organismos de características similares a las de los anfibios. Estos animales se desarrollaron a partir de una serie de peces dotados tanto de la facultad de respirar al aire libre como de dar algunos pasos en las zonas poco profundas de los lagos y los ríos en períodos de sequía. Se comportaban igual que los modernos peces pulmonados. No obstante, todos los anfibios deben permanecer cerca del agua, en la que ponen sus huevos. Los anfibios más antiguos fueron los primeros grandes vertebrados que se afincaron en tierra firme. Algunos de ellos tenían el tamaño de una persona adulta.

Las plantas terrestres ejercieron un impacto particularmente fuerte en la atmósfera debido a que inhalaban dióxido de carbono y exhalaban oxígeno. Los niveles de oxígeno del aire aumentaron con rapidez tras el período Ordovícico, ya que pasaron de representar entre un 5 y un 10 % de los gases atmosféricos, aproximadamente, a tasas muy superiores a las actuales, quizá del 35 %, aunque al final acabaron por estabilizarse. Hace unos 370 millones de años que los índices de oxigenación están situados, en la mayoría de los casos y de forma más o menos fija, en una horquilla comprendida entre el 17 y el 30 % del aire atmosférico.[11] Lo sabemos porque a lo largo de todo ese período los investigadores han encontrado pruebas que

atestiguan incendios espontáneos, y los objetos no pueden prender fuego si las tasas de oxígeno caen muy por debajo del 17 %. Es probable que la atmósfera alcanzara sus valores máximos de oxígeno en el transcurso del período Pérmico (en un intervalo situado entre 300 y 250 millones de años atrás).

Uno de los indicadores de que los niveles de oxigenación estaban aumentando fue la aparición de arrecifes de coral, porque esas formaciones necesitan enormes cantidades de ese gas. Los primeros grandes atolones coralinos surgieron en el período Ordovícico. En realidad, los corales son grandes colonias simbióticas formadas por minúsculos animales invertebrados genéticamente idénticos. Considerados como una unidad, son una suerte de animales gigantescos desparramados por el fondo marino y dotados de un esqueleto sólido, aunque un tanto informe. Todos los bajíos de coral albergan colonias de organismos unicelulares cuya capacidad fotosintética suministra energía al conjunto. Los arrecifes de coral constituían un acogedor refugio para muchos organismos de buen tamaño, entre los que se contaban los trilobites, las esponjas y los moluscos.

Los crecientes niveles de oxígeno alentaron una segunda oleada de metazoos decididos a colonizar los continentes. Esto sucedió en el período Devónico, que se inició hace unos 370 millones de años. Las primeras plantas provistas de un esqueleto de madera con el que podían mantenerse erguidas y contrarrestar así el efecto de la gravedad aparecieron hace unos 375 millones de años, y poco después los bosques más antiguos empezaban a cubrir el suelo. Este manto vegetal fijaba enormes volúmenes de carbono por medio de la fotosíntesis, así que, a medida que la Tierra fue cubriéndose de verdor, los niveles de dióxido de carbono descendieron hasta alcanzar posiblemente valores próximos a la décima parte de su anterior concentración.[12] El impacto de los bosques primitivos se reveló particularmente significativo, pues hasta entonces no había ningún organismo capaz de degradar la lignina de la madera. A eso se debe que los bosques del período Carbonífero (en el intervalo que

va de los –360 a los –300 millones de años) terminaran casi siempre sepultados bajo tierra, junto con el carbono que habían extraído de la atmósfera. Con el paso del tiempo se fosilizaron y dieron lugar a las vetas de carbón que más tarde servirían para impulsar la revolución industrial. Cerca del 90 % de los yacimientos actuales de hulla quedaron enterrados durante el período marcado por la existencia de unos valores de oxígeno elevados, entre 330 y 260 millones de años atrás. Debido a la gran cantidad de oxígeno, el impacto de los rayos provocaba incendios forestales con gran facilidad. Por consiguiente, es probable que en la atmósfera del Carbonífero y del arranque del Pérmico, pese a ser muy fría, flotara el olor acre de la madera quemada (un olor que nadie detectará en otros planetas de nuestro sistema solar porque carecen de los altos índices de oxigenación y del material combustible que representa la madera, y sin esos elementos no puede propagarse el fuego).

Es probable que los bosques del Carbonífero duplicaran los índices de la actividad fotosintética, y que eso multiplicara por dos el presupuesto energético global de la biosfera, lo que a su vez debió de permitir la producción de muchos más organismos.[13] Las plantas refinaron el termostato geológico de la Tierra, pues aceleraron el desgaste de las rocas al triturarlas y disolverlas hasta convertirlas en un suelo fértil capaz de transportar más fácilmente el carbono sepultado a los océanos. Una vez allí, parte de ese carbono acabó hundiéndose en las profundidades del manto. En ese entorno subterráneo, el carbono no podía seguir reaccionando con el oxígeno para formar dióxido de carbono, así que los índices de oxigenación volvieron a subir. Esto explica que la cantidad de oxígeno libre dependa *grosso modo* de los volúmenes de carbono que hayan quedado subducidos bajo el manto, lo que significa que los niveles atmosféricos de oxígeno y dióxido de carbono tienden a evolucionar en direcciones opuestas. El aumento de las tasas de oxígeno también permitió que se produjeran nuevas reacciones químicas en

la corteza, y esto contribuyó a la formación de los cuatro mil tipos de minerales distintos que en la actualidad podemos encontrar en el planeta.[14]

Entre 450 y 300 millones de años atrás, desde el final del período Ordovícico hasta el comienzo del Pérmico, los bosques y los metazoos afincados en tierra firme transformaron la superficie del globo, cubriendo de verdor los continentes y reiniciando los termostatos de la biosfera, lo que determinó a su vez el surgimiento del régimen atmosférico característico de finales del Fanerozoico, marcado por unos elevados niveles de oxígeno y una reducida tasa de dióxido de carbono.

LAS TENDENCIAS A LARGO PLAZO: CUERPOS Y CEREBROS MÁS GRANDES

La historia de las formas de vida de dimensiones apreciables, como la historia de la complejidad en general, aparece regida por el azar y la necesidad. Los procesos de extinción masiva ilustran muy bien el espectacular papel que desempeña en este sentido el primero de esos dos factores. Sin esos episodios de desaparición de especies, en nuestros días la biosfera tendría un aspecto muy distinto. Sin embargo, la evolución nunca ha estado por completo en manos de la casualidad. La probabilidad de que ocurrieran ciertos cambios era mayor que la de otros. Por lo tanto, y a pesar de que las simples contingencias hayan moldeado la historia de los organismos de gran tamaño, también puede advertirse que la acción de ciertas tendencias de carácter sistemático se mantiene por muchas conmociones que provoquen los impactos de los asteroides, las erupciones volcánicas y las extinciones generalizadas. La orientación que pueda seguir a largo plazo el curso de los acontecimientos tiene para nosotros la misma importancia que las catástrofes repentinas.

Uno de los horizontes que pareció perseverar en el tiempo fue el que propició la creación de organismos cada vez mayores. Esa fue la dirección que se tomó para crear a los metazoos, pero también la que estimuló el desarrollo de animales y plantas de dimensiones crecientes, porque, desde el punto de vista evolutivo, a menudo resulta muy sensato adquirir proporciones de gigante. A fin de cuentas, a mayor volumen, menor número de predadores. ¡Intente echarle el lazo a una ballena azul! Los seres vivos grandes también necesitan menos alimento por unidad de peso corporal, y por regla general les resulta más sencillo eludir la catástrofe de la desecación.[15] Por otra parte, los altos niveles de oxígeno del régimen atmosférico que se instauró a principios del eón Fanerozoico aportaron la energía necesaria para impulsar a los megametazoos. De hecho, es muy probable que los seres vivos realmente enormes prosperen en los períodos en que los índices de oxigenación son más altos, circunstancia que suele darse cuando los valores de dióxido de carbono son bajos y los climas gélidos. Esto vale tanto para los océanos como para los continentes, puesto que el agua fría logra disolver más oxígeno que la caliente.

Al dispararse las tasas de oxígeno, un gran número de vías evolutivas optaron por probar a desarrollar cuerpos de mayor tamaño. Detectamos la presencia de insectos y vertebrados gigantescos en los períodos Carbonífero y Pérmico, en los que podríamos haber visto libélulas de cincuenta centímetros de envergadura o criaturas similares a los escorpiones de noventa centímetros de largo y veinte kilos de peso. Los primeros reptiles aparecieron en el período Carbonífero, que se inició hace unos 320 millones de años. Estos seres formaban parte de un nuevo grupo de animales, los amniotas, que agrupa a los reptiles, los pájaros y los mamíferos. A diferencia de los anfibios, los amniotas pueden reproducirse lejos del agua, ya que sus crías se desarrollan en el interior de unas estructuras protegidas (ya sean huevos, bolsas o

úteros). La clase de los reptiles alumbró algunos de los mayores animales que jamás hayan caminado, deambulado, reptado o galopado por la superficie de la Tierra.

A la extinción masiva de finales del período Pérmico le siguió, ya en el Triásico (en un intervalo comprendido entre 250 y 200 millones de años atrás), una nueva fase de radiación adaptativa. Es en ese lapso de tiempo cuando aparecen los primeros grandes dinosaurios (¡no todos los dinosaurios son imponentes!), pero en las últimas fases del período Triásico los niveles de oxígeno empezaron de nuevo a descender, el planeta se calentó y a los titánicos metazoos de la época la supervivencia se les puso muy cuesta arriba. El mundo del Triásico llegó bruscamente a su fin hace doscientos millones de años como consecuencia de un nuevo proceso de extinción generalizada provocado por el efecto invernadero. Los miembros de la familia de los dinosaurios que consiguieron sobrevivir desarrollaron mecanismos muy eficaces para poder respirar en un entorno casi privado de oxígeno. Es posible incluso que esos sistemas estimularan la bipedestación (pensemos por ejemplo en el *Tyrannosaurus rex* y en las aves actuales), puesto que en los reptiles bípedos el pecho se expande mejor y los movimientos del desplazamiento no obstaculizan la respiración, como sí ocurre con los patosos andares de los reptiles que se mueven a cuatro patas. A lo largo del período Jurásico (de 200 a 150 millones de años atrás), los índices de oxígeno subieron de nuevo y se situaron en valores próximos a los que hoy existen, de modo que los dinosaurios volvieron a aumentar de tamaño. Los mayores de todos hollaron la Tierra entre finales del período Jurásico y principios del Cretáceo, de 160 a 65 millones de años atrás. Al estar provistos de un aparato pulmonar más eficiente que el de sus antepasados del Triásico, estos grandes saurios lograron explotar las enormes cantidades de energía que les ofrecía la atmósfera de la época, rica en oxígeno, para hacer funcionar sus enormes corpachones.

Las primeras aves propiamente dichas aparecieron a finales del período Jurásico. También ellas dependían de la existencia de unos elevados índices de oxígeno en la atmósfera, pues, como bien sabe cualquier piloto, el vuelo exige muchísima energía. Del *Archaeopteryx*, una de las más antiguas criaturas aladas, se conservan los fósiles hallados en Alemania en 1861, apenas dos años después de que Darwin publicara *El origen de las especies*. Esta especie de pájaro primitivo vivió hace aproximadamente 150 millones de años y su tamaño era parecido al de un cuervo. A juicio de Charles Darwin, su descubrimiento constituía una sólida prueba de que su teoría de la evolución por selección natural era cierta, dado que mostraba la existencia de especies de transición, situadas a medio camino entre los reptiles y las aves. Muchas de las características del arqueópterix eran similares a las de los pájaros, pero al mismo tiempo conservaba rasgos típicos de los reptiles, como las garras, la cola provista de huesos y los dientes. Los estudios más recientes no solo han puesto de manifiesto que a lo largo del período Cretácico surgieron muchas especies de aves dentadas, sino que estas coexistieron con los dinosaurios voladores.

Los mamíferos, al igual que el resto de los amniotas (reptiles y pájaros), también aparecieron tras la extinción masiva del período Pérmico. Los mamíferos también acabarían por generar algunos ejemplares gigantescos, pero estos no perduraron durante casi doscientos millones de años. Aun así, antes de adquirir tamaños dignos de consideración la mayoría de ellos llevaba una existencia gris al amparo de las sombras de un mundo dominado por los dinosaurios. A lo largo del Triásico, el Jurásico y el Cretáceo (el período comprendido entre –250 y –65 millones de años), la mayor parte de los mamíferos conservaron unas dimensiones reducidas y siguieron un comportamiento similar al de los actuales roedores: se dedicaban a escarbar y a excavar madrigueras.

Los mamíferos constituyen una clase de animales de sangre caliente y están emparentados con los demás amniotas, es decir, con los reptiles y las aves, pero difieren tanto de unos como de otros en

algunos aspectos cruciales. El cerebro de los mamíferos cuenta con un neocórtex, una estructura que les convierte en seres dotados de una soberbia capacidad de cálculo. Todos ellos poseen pelaje (sí, en efecto, los seres humanos también estamos cubiertos por una capa de pelo, aunque mucho menos espesa que la de la mayoría de nuestros parientes) y suelen ocuparse del cuidado de su progenie. El primer científico que dio a los animales pertenecientes a nuestra misma clase el nombre de «mamíferos» fue Carl Linneo, el fundador de la taxonomía moderna, y para ello se basó en otro de sus rasgos distintivos, ya que todos los mamíferos alimentan a sus crías con la leche que segregan las glándulas mamarias. A ojos de los paleontólogos, el rasgo visible y más diferenciador de los fósiles de mamíferos es la dentadura. Los dientes de los mamíferos, incluso los de los más primitivos, muestran una superficie cubierta de entrantes y salientes que permite que la dentición del maxilar superior encaje con la del inferior, y esto no solo permite la masticación de toda una serie de alimentos nuevos, sino que los tritura con una eficacia superior a la de los reptiles.

Los mamíferos son asimismo ejemplo de otra profunda tendencia evolutiva: contar con sistemas de procesamiento de la información más refinados. Esto se aprecia a lo largo de todo el Fanerozoico, pero además de resultar muy notable entre los animales, llega a su máxima expresión en el caso de los mamíferos.

Ya hemos visto que todos los seres vivos son *informávoros*. Recopilan información, la trabajan y actúan en consecuencia. En los organismos más sencillos, entre los cuales figuran los procariotas, la segunda fase (es decir, la del procesamiento) es muy rudimentaria, y en la mayoría de los casos se limita a una suerte de interruptor de apagado y encendido, como ocurre en las siguientes situaciones: «Aquí hace demasiado calor, así que pon a girar los flagelos en el sentido de las agujas del reloj y aléjate a toda velocidad». Los simples reflejos del dolor y el placer organizan buena parte de la información que se procesa *de facto*, incluso en los metazoos más elementales.

Sin embargo, a medida que los organismos fueron ganando en tamaño y complejidad, la cantidad de información que debían tratar para desenvolverse en sus respectivos entornos también creció. La selección natural dotó a los seres vivos de gran tamaño de un deseo dominante: de adquirir la mayor cantidad de información posible, pues contar con datos adecuados resultaba vital para su éxito. Esto explica que cuando el cerebro de los seres humanos resuelve un problema experimente un subidón similar al que obtiene con la comida o el sexo.[16] La selección natural sería también la responsable de los grandes organismos se cubrieran de un mayor número de sensores y al mismo tiempo se incrementara la diversidad de sus tipos posibles: para el sonido, para la presión, para la acidez, para la luz... En este sentido, la presión selectiva propició que el repertorio de respuestas potenciales también fuese en aumento. Por otra parte, a medida que el abanico de informaciones detectables y la diversidad de las reacciones factibles crecía, también la fase del procesamiento en sí se volvió más compleja, lo que hizo a su vez que el número de neuronas consagrado a esa tarea no dejara de aumentar. En los animales, los nervios comenzaron a agruparse hasta constituir nódulos, ganglios y cerebros, con lo que acabó por formarse un conjunto de redes de interruptores surgidos para cumplir funciones similares a las de los transistores. Mediante esa especie de clavijas se unieron cientos, millones o miles de millones de neuronas, todas ellas capaces de procesar la información en paralelo. Esto les permitió concebir modelos susceptibles de recabar algunas de las características más relevantes del mundo exterior, llegando en algunos casos a dotarlas de la facultad de establecer conjeturas relacionadas con posibilidades futuras. Ninguna de las criaturas provistas de cerebro (ni siquiera usted y yo) se encuentra en contacto directo con el entorno. Todo lo contrario, pues vivimos en la detallada realidad virtual que construyen nuestros cerebros. Estos generan mapas, incesantemente actualizados, de las circunstancias más descollantes de nuestro cuerpo y el medio en el que nos desenvolvemos, tal como hacen los meteorólogos actuales

cuando crean modelos que reproducen los rasgos más destacados de algo tan voluble como el clima.[17] Esos mapas no solo son los responsables de que mantengamos nuestra homeostasis, también nos ayudan a responder apropiadamente, al menos en la mayoría de los casos, al infatigable torbellino de transformaciones que nos rodea.

En los seres dotados de cerebro, la toma de decisiones opera en varios planos. Hay decisiones que deben tomarse con mucha rapidez, sobre todo si no hay tiempo para una deliberación pausada. Otros mecanismos relacionados con la adopción de resoluciones son más lentos y laboriosos, pero nos permiten evaluar un mayor número de opciones. Pese a su notable sencillez (pues solo admiten dos posiciones: encendido o apagado), los interruptores del dolor controlan buena parte de la conducta de los metazoos, aun en el caso de los más complejos. Si por alguna razón ponemos la mano demasiado cerca de una llama, advertiremos que enseguida la apartamos antes de plantearnos absolutamente nada. Las emociones, dominadas por el sistema límbico, también permiten que los procesos de toma de decisiones sean muy rápidos, ya que crean un conjunto de predisposiciones y preferencias que se encargan de orientar buena parte de las decisiones trascendentes y de que lo resuelto, por lo menos en la mayoría de los casos coincida además con lo más acertado. Charles Darwin comprendió que las emociones no son solo factores que determinan la toma de decisiones, sino que evolucionaron por medio de la selección natural para contribuir a la supervivencia de los seres vivos. Si un antílope se acercara a los leones con la intención de abrazarlos sería muy poco probable que tuviera ocasión de pasar sus genes a su descendencia. Da la impresión de que en nuestro interior bulle una suerte de magma de emociones elementales, difíciles de someter al control de la conciencia. Entre ellas figuran el miedo y la ira, la sorpresa y el asco, y quizá una cierta sensación de felicidad. Esas emociones nos predisponen a reaccionar de una determinada manera y desencadenan la liberación de una serie de señales químicas que

preparan al organismo para echar a correr, concentrar la atención, lanzarse al ataque o rodear con los brazos a un ser querido.[18] En todos los animales provistos de un cerebro de gran tamaño, las emociones son el motor de muchas decisiones, y es probable que algunas emociones, como el miedo, estén presentes en todos los vertebrados; incluso es posible que se den en algunos invertebrados, sobre todo en los más inteligentes, como el pulpo. Las tendencias que generan las emociones al hacernos preferir unas consecuencias y unas conductas específicas son el factor que subyace a la percepción humana del significado y la ética.

La facultad a la que menudo denominamos «razón» no es más que uno de los muchos elementos biológicos que nos permiten tomar decisiones. Si el cerebro es lo suficientemente grande, si se dispone de mucho tiempo y si los demás sistemas se revelan incapaces de proporcionar una respuesta clara por estar bloqueados, la razón juzga y arbitra las resoluciones más relevantes. ¿De veras necesito invertir una enorme cantidad de energía en una veloz carrera si al final resulta que eso que veo allí no es en realidad un león? Las amenazas que me dirige mi rival, ¿son simples bravuconadas o debo responder a ellas?

Tomadas en conjunto, las sensaciones, emociones y pensamientos crean el universo interior y subjetivo que todos los seres humanos conocemos (y es probable que también forme parte de la experiencia de otras muchas especies provistas de un gran cerebro). El estado al que damos el nombre de «conciencia», que actúa cuando es preciso tomar decisiones nuevas, difíciles e importantes, parece ser una modalidad de atención marcada por una concentración mental particularmente intensa, como si el cerebro compareciera ante un tribunal. Esto sugiere que la conciencia se halla presente, al menos hasta cierto punto, en muchos organismos dotados de un cerebro lo suficientemente voluminoso como para disponer del espacio de trabajo necesario para tomar decisiones verdaderamente complejas.[19] Sin embargo, para las decisiones rutinarias no es necesario recurrir a este método.

Si a todos estos sistemas de toma de decisiones le añadimos la memoria, tendremos los cimientos del aprendizaje complejo, la capacidad de registrar los resultados de resoluciones anteriores y la posibilidad de utilizar los datos almacenados para la futura toma de decisiones más ajustadas a las exigencias del caso. El pez conocido como «lábrido limpiador», por ejemplo, desparasita los dientes de una serie de peces que no tendrían ninguna dificultad en comérselo. Así pues, no solo debe aprender cuáles son los clientes que no están dispuestos a devorarlos, sino también dispuestos a ofrecerles la comida gratuita que supone para el lábrido esa limpieza bucal. La memoria puede conservar el recuerdo de diferentes decisiones tomadas de forma consciente y emplearlas más tarde para generar rápidas respuestas automáticas. Cuando alguien ha aprendido a conducir un coche ya no necesita pensar en la larga lista de gestos que debe hacer en cuanto el semáforo se pone en rojo. Simplemente, el cuerpo se ocupa de todo. Ni siquiera nos daremos cuenta de la presión que ejerce el pie al pisar el freno.

Estos refinados sistemas de modelización y toma de decisiones se desarrollaron a lo largo del eón Fanerozoico. Su evolución resultó espectacular sobre todo en el caso de los animales, porque los ejemplares de este reino tienen que tomar más decisiones que las plantas. En la mayoría de los invertebrados, las redes neuronales quedaron distribuidas por todo el cuerpo, aunque en muchos casos también se concentraron en unos cuantos nodos o ganglios concretos. Partiendo de esas redes, algunos invertebrados, como los pulpos, han construido sistemas destinados al procesamiento de la información. De hecho, la mayor parte de las neuronas del pulpo se encuentran en sus tentáculos. En el subfilo de los vertebrados también abundan los casos en que las neuronas llegan a zonas del cuerpo muy profundas, aunque se mantienen en contacto con las células sensoriales y las motoras, que son las que llevan a cabo las decisiones. No obstante, cuando se multiplicaron los sensores y aumentó el carácter crítico del tratamiento de la información, creció también el número de neuronas agrupadas en forma de cerebro, con

lo que este órgano y las células nerviosas que lo componen se especializaron en el procesamiento de los datos recogidos por el cuerpo. El tratamiento de la información se reveló particularmente importante en los linajes biológicos más complejos y ávidos de información, como las aves y los mamíferos, aunque estos organismos, que difieren muy notablemente unos de otros, acabaron por desarrollar un conjunto de subsistemas muy distintos para manejar grandes volúmenes de datos.[20]

En los mamíferos, la creciente importancia del procesamiento de la información contribuye a explicar la evolución y el crecimiento del córtex, es decir, de las capas de materia gris que se sitúan en la parte más externa del cerebro. El córtex no solo dispone de mucho espacio para la realización de cálculos, sino que cuenta también con una capacidad de tratamiento de datos muy superior a la de cualquier otra agrupación neuronal, razón por la que permite resolver mejor los problemas cuando surgen situaciones poco habituales o cuando los demás sistemas de toma de decisiones se encuentran paralizados. Al final, los mamíferos provistos de una mayor actividad cerebral terminaron por desarrollar un conjunto de sistemas dedicados de manera general al procesamiento de la información y a la resolución de problemas, y de hecho, esos sistemas han evolucionado tanto que hoy son al mundo bacteriano lo que Internet es al ábaco. En último término, el progreso y la mejora de la facultad de resolver problemas y de los sistemas destinados al procesamiento de la información acabó dando lugar a la explosión de la importancia de la información puesta en marcha por nuestra propia y notabilísima especie.

Del impacto de un asteroide como golpe de suerte para los mamíferos

La formidable fuerza muscular de los dinosaurios prevaleció durante mucho tiempo sobre el cerebro de los mamíferos, pero hace 65 millones de años se produjo un súbito cambio, literalmente caído

del cielo.

El mundo de los dinosaurios se desvaneció en pocas horas tras chocar contra la Tierra un asteroide de entre 10 y 15 kilómetros de anchura.[21] El impacto provocó un episodio de extinción generalizada durante el cual desaparecieron casi la mitad de los géneros biológicos. Los geólogos se refieren a este suceso como el acontecimiento del límite K/T, debido a que se produjo en la frontera temporal que separa el período Cretácico (que muy a menudo se abrevia con la sigla «K», dado que es la inicial de la palabra alemana *Kreide*, que significa creta, en alusión a las formaciones de carbonato cálcico de esa división geológica) del período Terciario (que es como antiguamente se conocía a la era cenozoica), cuyo arranque se sitúa hace 65 millones de años.

Este asteroide chocó contra nuestro planeta a una velocidad de 30 kilómetros por segundo (unos 100.000 kilómetros por hora), lo cual significa que tardó apenas unos segundos en cruzar la atmósfera terrestre. Sabemos además cuál fue el punto exacto del impacto: el cráter de Chicxulub, en la península de Yucatán, en el actual México. El asteroide se evaporó al perforar la corteza y dejó tras de sí un cráter de casi doscientos kilómetros de diámetro. Las rocas fundidas salieron despedidas por los aires, formando unas nubes de polvo tan densas que la luz del sol no pudo alcanzar la superficie del planeta durante meses. La piedra caliza se evaporó, rociando de dióxido de carbono la atmósfera. Alrededor del punto del impacto, la vida desapareció en un radio de varios cientos de kilómetros. A varios centenares de kilómetros de distancia del perímetro de esa zona muerta los bosques se convirtieron en una inmensa pira. En el mar, el tsunami subsiguiente formó una pared de agua que se estrelló contra las costas del golfo de México y mató a todos los peces, así como a los dinosaurios que se encontraban a varios cientos de kilómetros de distancia del litoral. En la Formación Hell Creek (o «cañada del infierno»), a caballo entre Montana y Wyoming, pueden encontrarse fósiles de peces con las agallas repletas de cristales creados por el impacto del asteroide.[22]

En las tierras más alejadas, los efectos inmediatos no fueron tan dantescos, pero a las pocas semanas, el conjunto de la biosfera había experimentado ya una profunda transformación. La ceniza eclipsó al sol, dando lugar a lo que hoy denominaríamos un «invierno nuclear». El cielo empezó a verter lluvias de ácido nítrico sobre el planeta y mató a la mayor parte de los organismos con los que entró en contacto. La superficie de la Tierra debió de quedar sumida en una oscuridad total durante uno o dos años, lo que detuvo por completo la actividad fotosintética e interrumpió la vital conexión que une el destino del mundo vivo con el sol. Cuando el polvo en suspensión empezó a asentarse y la energía solar a filtrarse a través de la calima, la Tierra se calentó con rapidez, dado que entonces la atmósfera contenía una cantidad de dióxido de carbono y metano muy superiores a las existentes antes de la colisión. Varios años después del impacto, los maltrechos vegetales que lograron sobrevivir pudieron reanudar el proceso de la fotosíntesis y respirar, pero a partir de entonces tuvieron que hacerlo en un mundo recalentado por el efecto invernadero.

La biosfera debió de necesitar varios miles de años para recuperar algo remotamente similar a la normalidad, pero es posible que en el transcurso de ese largo lapso de tiempo la mitad de los géneros biológicos preexistentes se desvanecieran. Como suele suceder en estas crisis, las especies de grandes dimensiones son las que salen peor paradas, porque que necesitan más energía, son menos numerosas y se reproducen más lentamente que las criaturas de menor tamaño. Eso condenó a los dinosaurios más voluminosos. Sin embargo, los pájaros modernos descienden de los dinosaurios más pequeños, de modo que algunos de ellos consiguieron salvarse. Otros organismos de talla aún más reducida, como los mamíferos similares a los roedores, se las arreglaron algo mejor, y entre ellos figuraban precisamente los llamados a convertirse en nuestros antepasados directos.

Las primeras pruebas relacionadas con el impacto de este asteroide se descubrieron en Italia, en una serie de rocas halladas por el geólogo Walter Alvarez y su equipo. Los geólogos ya sabían de las asombrosas diferencias existentes entre las formaciones minerales anteriores y posteriores a la línea divisoria que separa el fin del período Cretácico de su inmediato sucesor. Es frecuente hallar fósiles de plancton (conocidos como «foraminíferos») en los estratos geológicos más antiguos del Cretácico, aunque justo antes de esa frontera temporal, pero después de ese límite temporal se desvanecen. Lo que no podía evaluarse con claridad era si el cambio había tardado varias decenas de miles de años en producirse o si había necesitado solo uno o dos años para completarse. En 1977, los colaboradores de Alvarez descubrieron en un yacimiento situado cerca de la población de Gubbio, en Italia, la existencia de unos niveles extremadamente altos de un raro elemento químico, el iridio, y determinaron que su formación se remontaba a los últimos momentos del Cretácico. Ese hallazgo resultaba muy extraño, porque la presencia de iridio en la Tierra es sumamente escasa, aunque es común en los asteroides. Alvarez y sus colegas también detectaron concentraciones muy elevadas de iridio en otros muchos emplazamientos italianos, y hoy sabemos que hay al menos un centenar de yacimientos similares en todo el mundo. El equipo de Alvarez empezó a conjeturar que el iridio debía de haber llegado a nuestro planeta a bordo de algún asteroide. Y eso sugería la incidencia de un acontecimiento catastrófico.

En la década de 1970, la mayoría de los geólogos se atenían a la idea de que todo cambio geológico era gradual, de modo que el planteamiento de Alvarez fue acogido con suma reticencia. Exigían alguna prueba directa, una especie de pistola humeante geológica. Esta apareció finalmente en 1990, al mostrarse que el cráter de Chicxulub tenía el tamaño exacto del impacto buscado y que se había formado precisamente en la fecha en la que se habían constatado los cambios. Desde entonces, la mayoría de los geólogos aceptan no solo el choque de un asteroide como causa de la

desaparición de los dinosaurios, sino la probabilidad de que ese tipo de acontecimientos catastróficos se hayan producido muchas veces a lo largo de la historia del planeta. Es verdad que también hay constancia de otro fenómeno fechado en torno al límite K/T: una serie de inmensas erupciones volcánicas que muy posiblemente minara del mismo modo la salud de la biosfera, pero hoy apenas se duda ya de que el golpe fatal hay que atribuirlo a un asteroide.

El mundo posterior al suceso de Chicxulub fue el mundo en el que estaban llamados a evolucionar los mamíferos de los que descendemos. Se había preparado así el escenario de la era cenozoica, que abarca los últimos 65 millones de años de historia de la Tierra.

Después del asteroide: la radiación adaptativa de los mamíferos

En tanto que mamíferos, los seres humanos compartimos el 90 % de nuestros genes con el resto de nuestros congéneres, sean ratas o mapaches (lo que significa que tenemos en común cerca de tres mil millones de pares de bases de ADN). En algún punto del 10 % de ADN restante se encuentran los genes que nos distinguen de ellos.

Como el resto de los mamíferos, somos criaturas de sangre caliente, lo que significa que necesitamos más energía que la mayoría de los reptiles para mantener nuestra temperatura corporal y el funcionamiento de nuestros cerebros. Además, estos últimos han de estar en plena forma, pues han de ser capaces de idear el gran número de ardides ecológicos necesarios para conseguir los abundantes flujos de energía y alimento que nuestros organismos requieren. Pese a que las primeras criaturas de tipo mamífero no fueran mayores que un ratón, es probable que ya prodigaran cuidados especiales a sus crías, tal como hacen los mamíferos actuales, y también es muy posible que contaran con un cerebro de tamaño insólitamente grande en comparación con el resto de sus

dimensiones corporales. La división básica entre los marsupiales (es decir, aquellos mamíferos cuyos hijos requieren una protección especial y un tipo de alimento particular y que muy a menudo completan su crecimiento en una bolsa de piel llamada «marsupio») y los placentarios (los mamíferos cuya descendencia recibe el alimento en el útero, a través de un órgano de intercambio llamado «placenta») se produjo hace al menos 170 millones de años.

En el transcurso de los 150 millones de años que duraron, aproximada y conjuntamente, los períodos Jurásico y Cretácico, la mayoría de las especies de mamíferos conservaron unas dimensiones reducidas que les permitía escabullirse entre la maleza de los bosques aun cuando estuviesen iluminados por la luna.[23] Los había de muchas formas diferentes. Unos tenían un aspecto parecido al de un perro, como el *repenomamus*, un animal de talla suficiente para devorar tanto a los pequeños dinosaurios como a sus crías. Otros aprendieron a nadar y regresaron a los océanos. Había especies que a primera vista podrían confundirse con los actuales murciélagos, familias que preferían una dieta a base de insectos y géneros que se encaramaban a los árboles. Hace unos 150 millones de años, el mundo de los mamíferos se transformó debido al desarrollo de un nuevo abanico de tipos de plantas, surgidas para competir con las coníferas y los helechos que hasta entonces habían venido dominando el universo vegetal. Se trataba de las angiospermas, es decir, de un conjunto de plantas con flores y frutos (cuya clase es justamente la predominante en las selvas, los bosques, los parques y los patios de nuestros días). Las plantas florales se convirtieron en una abundante fuente de comida para todos los mamíferos provistos de dientes diseñados para morder y masticar sus frutos y semillas (o para consumir los numerosos insectos que también se alimentaban de ellas o contribuían a su polinización).

Es posible que el impacto del asteroide que segó la vida de los dinosaurios acabara también con las tres cuartas partes de las especies de mamíferos existentes hasta entonces. Sin embargo, en

esa época, la mayoría de los mamíferos eran todavía de una talla reducida, así que algunos de ellos pudieron colarse por entre las rendijas de la subsiguiente crisis evolutiva. Cuando el planeta recobró algo parecido a una situación normal, los organismos que habían sobrevivido al asteroide de Chicxulub se encontraron de pronto inmersos en un mundo tan nuevo como extraño. Con la desaparición de los dinosaurios habían surgido nuevas oportunidades. Los mamíferos se diversificaron, dando lugar a una radiación evolutiva, tal como sucedería hoy con los pequeños comercios si de la noche a la mañana todas las grandes compañías se declararan en bancarrota. De este modo, muchas especies de mamíferos optaron por crecer. En medio millón de años la Tierra se pobló de herbívoros del tamaño de una vaca y de carnívoros de dimensiones comparables. Aparecieron también los primates, que no solo son integrantes del orden de los placentarios que viven en los árboles, sino también miembros de la clase de los mamíferos frugívoros de los que nosotros mismos descendemos. Pese a que los primeros primates ya poblaban los continentes en tiempos de los dinosaurios, lo cierto es que no empezaron a prosperar hasta que estos terribles lagartos hicieron mutis por el foro.

No obstante, antes de que los mamíferos pudieran conquistar el planeta tuvieron que sobrevivir a una nueva crisis biológica. Esta se debió al Máximo Térmico del Paleoceno-Eoceno (MTPE, para los amantes de las siglas), un breve y acusado incremento de las temperaturas globales provocado por los gases de efecto invernadero. Este brusco cambio climático marcó el fin del Paleoceno y el inicio del Eoceno, lo que significa que se produjo hace 56 millones de años aproximadamente. Sus efectos fueron lo bastante perjudiciales para abocar a la extinción a muchísimas especies. Si el MTPE reviste hoy un interés especial se debe justamente a que constituye el episodio más reciente, de cuantos ha conocido la historia de la Tierra, de un calentamiento rápido imputable a los gases de efecto invernadero, lo que implica que puede ayudarnos a comprender el cambio climático que atravesamos en la actualidad.

Los paralelismos son estremecedores. Las cantidades de dióxido de carbono que se liberaron a la atmósfera durante el MTPE fueron de una magnitud similar a la que genera hoy el empleo de los combustibles fósiles, y hace 56 millones de años ese proceso hizo que la temperatura media del planeta aumentara entre cinco y nueve grados Celsius.[24]

¿Qué produjo ese súbito calentamiento? Entre –58 y –56 millones de años, la actividad volcánica fue particularmente intensa, con lo que el dióxido de carbono de los volcanes debió de incrementar los niveles atmosféricos de ese gas. Sin embargo, a este fenómeno se añadió de pronto otro cuyas causas ignoramos pero que fue extremadamente rápido, ya que es posible que durara apenas diez mil años, lo que equivale poco más o menos al tiempo que ha transcurrido en la historia de la humanidad desde que apareciera por primera vez la agricultura. Al término de ese lapso de tiempo, muchas especies de plantas, animales y seres marinos se habían esfumado. Actualmente, la mejor hipótesis de que disponemos sostiene que los océanos polares se calentaron tanto que los clatratos (las grandes bolas de metano congelado que ya hemos mencionado y que, pese a parecer de hielo, arden si se les acerca una cerilla) se derritieron a toda velocidad, liberando con ello enormes cantidades de metano, un gas cuya capacidad de provocar un efecto invernadero es superior incluso a la del dióxido de carbono. Esto debió de incrementar a toda velocidad la temperatura del globo. Si esta hipótesis es correcta, hay que vigilar muy de cerca la evolución de los clatratos de metano que todavía permanecen congelados en los océanos polares.

Tras un pico climático que posiblemente mantuviera el termómetro en niveles elevados durante unos doscientos mil años, las temperaturas del planeta iniciaron un largo y lento descenso hacia valores más frescos, jalonado no obstante por breves intervalos en los que el proceso se invirtió. Los índices de dióxido de carbono volvieron a caer una vez más, incrementándose al mismo tiempo la proporción de oxígeno de la atmósfera. Las diferencias de

temperatura entre el ecuador y las regiones polares se acentuaron, los casquetes ártico y antártico se cubrieron de hielo, lo que conllevó la congelación de grandes volúmenes de agua en las lenguas glaciares y generó en último término una disminución del nivel de los mares.

Este enfriamiento se debió en parte a la incidencia de ciertos cambios registrados en los ciclos orbitales y en la inclinación misma del eje de la Tierra. Estas variaciones reciben el nombre de ciclos de Milanković, en honor al científico que las describió por primera vez. Al alterarse la órbita y la inclinación axial del planeta, la cantidad de energía que este recibía del sol experimentó igualmente una serie de sutiles variaciones. Es posible que también intervinieran los procesos tectónicos, ya que el océano Atlántico se agrandó y el vasto continente meridional de Gonwana se fragmentó, lo que dio origen al perfil que actualmente presentan las tierras emergidas. Al quedar fijada en el polo sur, la Antártida se convirtió en una plataforma óptima para la acumulación de inmensas capas de hielo. Por otra parte, los continentes de la mitad septentrional del globo se agruparon en torno al océano polar, con lo que las corrientes cálidas ecuatoriales dejaron de bañar las regiones polares de ese hemisferio. Entretanto, la colisión de la placa índica con el bloque euroasiático hizo brotar los Himalayas, lo que a su vez aceleró la erosión y aumentó tanto el ritmo de extracción de carbono del aire como la velocidad del doble arrastre que lo conduce al mar y a la corteza terrestre.

Cabe también la posibilidad de que los seres vivos contribuyeran al enfriamiento de la biosfera. En los últimos treinta millones de años, a medida que fue concretándose la disminución de las necesidades de dióxido de carbono, empezaron a desarrollarse nuevos tipos de plantas, de entre las que destacan las gramíneas que cubren, en forma de lo que habitualmente llamamos «hierba», las sabanas modernas y los céspedes de las zonas verdes urbanas. Estos vegetales utilizaban una nueva forma de fotosíntesis: la que se sirve de la ruta C_4. Esta modalidad fotosintética era más eficiente

que la del tipo C_3, que es la que emplean los árboles y los arbustos. Debido a su superior eficacia, esta fotosíntesis se reveló capaz de absorber mayores cantidades de carbono de la atmósfera.[25]

Fueran cuales fuesen las causas precisas de este enfriamiento, la tendencia, iniciada hace aproximadamente cincuenta millones de años, se ha mantenido hasta nuestros días. Hace unos 2,6 millones de años, a comienzos del Pleistoceno, el mundo cruzó el umbral de la fase en la que nos encontramos en la actualidad, marcada por una periódica sucesión de eras glaciales. Hacía doscientos cincuenta millones de años que el clima del planeta no alcanzaba temperaturas tan bajas, desde que el supercontinente de Pangea se desmembrara, a finales del período Pérmico. Y fue justamente ese universo posterior a los dinosaurios y al Máximo Térmico del Paleoceno-Eoceno, ese escenario regido por una larga serie de cambios climáticos tan gélidos como erráticos, el que hace cincuenta millones de años asistió al inicio de la evolución de los primates llamada a propiciar la aparición de los seres humanos.

TERCERA PARTE

NOSOTROS

Capítulo 7

SERES HUMANOS: UMBRAL 6

> «La existencia de un lenguaje común establece entre los miembros de una comunidad un vínculo que los convierte en una red de información compartida dotada de formidables poderes colectivos.»
>
> Steven Pinker, *El instinto del lenguaje*

> «El conjunto de la humanidad posee una serie de rasgos comunes que los historiadores podrían tratar de entender con la misma solidez con la que alcanzan a comprender lo que une a cualquier otro grupo de menor tamaño.»
>
> William H. McNeill, «Mythistory»

La aparición de los seres humanos en nuestra historia de los orígenes es un acontecimiento trascendental. Vinimos al mundo hace solo unos cuantos centenares de miles de años, pero hoy estamos empezando a transformar la biosfera. Ya hubo en épocas pasadas grupos de organismos capaces de modificar la biosfera, como por ejemplo las cianobacterias, pero nunca antes una sola especie de bacteria había ejercido semejante poder. Es más, en lo que estamos haciendo hay otra cosa que también resulta por completo novedosa. Nuestra capacidad de compartir mapas individuales de nuestro entorno nos ha permitido elaborar también una profunda comprensión colectiva del espacio y el tiempo que subyace a todas las historias de los orígenes que concebidas hasta la fecha. Este

logro, que todo parece indicar que es exclusivo de nuestra especie, implica que, en la actualidad, una minúscula parte del universo está empezando a conocerse a sí misma.

El relato de la historia humana que me dispongo a exponer a continuación apenas abordará los temas que los historiadores suelen debatir: las guerras y sus cabecillas, los estados y los imperios, o incluso la evolución de las diferentes tradiciones artísticas, religiosas y filosóficas. En vez de ocuparnos de esos asuntos, seguiremos centrándonos en los temas principales de nuestra historia moderna de los orígenes. Observaremos la aparición de nuevas formas de complejidad, y en este caso se tratará de una complejidad generada por una especie nueva y capaz de utilizar la información de un modo nunca antes visto con el objetivo de explotar flujos de energía progresivamente crecientes. Veremos que los seres humanos, que en un primer momento nos asociamos para formar un conjunto de comunidades locales y que sin embargo hemos acabado estableciendo vínculos por todo el mundo, empezamos a transformar la biosfera —primero muy despacio y luego a mayor velocidad— hasta convertirnos en lo hoy somos: una especie que está modificando el planeta. Comprenderemos también que no está del todo claro cómo acabaremos utilizando nuestro poder. No obstante, lo que sí sabemos ya es que los seres humanos, y de hecho la totalidad de la biosfera, atraviesa un período de profundos cambios que tal vez se revelen turbulentos.[1]

Pero ¿cómo hemos llegado hasta aquí? En este sentido, nuestra historia moderna de los orígenes puede contribuir a que nos hagamos una idea, ya que sitúa la peripecia de la humanidad en los más amplios círculos del desarrollo de la Tierra y la evolución del universo en su conjunto. La posibilidad de subir a una montaña para otear el panorama desde su cumbre puede ayudarnos a entender cuáles son los factores que nos hacen diferentes.

La evolución de los primates en un mundo sometido a un proceso de enfriamiento

Desde el punto de vista cultural, los seres humanos damos muestras de una diversidad asombrosa, y en ello reside en parte el secreto de nuestra fuerza. Sin embargo, en términos genéticos nos caracterizamos por una homogeneidad muy superior a la de nuestros más próximos parientes vivos: los chimpancés, los gorilas y los orangutanes. Esto se debe a que no llevamos aquí el tiempo que requeriría una mayor diversificación. Además, somos criaturas extraordinariamente sociables, y nos encanta viajar, de modo que los genes humanos se han ido transmitiendo con notable libertad entre los diferentes grupos.

Dentro de la clase de los mamíferos, pertenecemos al orden de los primates, como también los lémures, los monos y los grandes simios. La cuestión es que tenemos muchas cosas en común con nuestros parientes primates. Estamos casi seguros de que los primates más antiguos vivían en los árboles, y lo cierto es que a los jovencitos de nuestra especie (e incluyo aquí el comportamiento que yo mismo seguía en mis años mozos) no solo les encanta trepar a los árboles sino que suelen hacerlo muy bien. Para ese tipo de ejercicio hay que contar con un par de manos provistas de largos dedos, o tener pies igualmente prensiles para poder agarrarse al tronco y las ramas. Y si uno se propone además saltar de rama en rama, también es buena idea disponer de una visión estereoscópica que nos permita calibrar las distancias. Esto implica que los dos ojos han de estar alojados en la parte frontal de la cara, para que los campos de visión se solapen. (No intenten jamás saltar de rama en rama con un ojo cerrado.) Esto explica que todos los primates tengan manos y pies prensiles y un rostro plano con los globos oculares dirigidos hacia delante.

Los primates están dotados de una inteligencia excepcional. Sus cerebros son desproporcionadamente grandes en comparación con el cuerpo, y la capa que recubre la parte delantera y más externa del

cerebro (el neocórtex) es gigantesca. En la mayor parte de las especies de mamíferos, el córtex representa del 10 al 40 % del volumen cerebral. En los primates supone más del 50 %, y en los seres humanos nada menos que el 80 %.[2] Otro elemento que confirma la excepcionalidad de los seres humanos es su enorme número de neuronas corticales. Tenemos aproximadamente quince mil millones, es decir, más del doble que los chimpancés (que cuentan con unos seis mil millones).[3] Las ballenas y los elefantes, que en la lista de los animales con mayor cantidad de neuronas corticales son los que vienen inmediatamente después de los seres humanos, disponen de unos diez mil millones de células de este tipo, aunque en relación con su masa corporal el cerebro de estos titanes es menor que el de los chimpancés. Poseer un cerebro de gran tamaño confiere a los primates su fantástica facultad de adquirir, almacenar y utilizar la información que reciben de su entorno.

Ahora bien, ¿qué determina que el tamaño del cerebro de los primates sea tan notable? A simple vista, la pregunta (disculpad el chascarrillo) no es un quebradero de cabeza. ¿Acaso no resulta evidente que el cerebro es un órgano estupendo? No necesariamente debemos considerar que lo sea, pues consume mucha energía. El cerebro necesita veinte veces más energía que un volumen equivalente de tejido muscular. En el cuerpo de los seres humanos, el cerebro utiliza el 16 % de la energía disponible, aunque no representa más que el 2 % de la masa corporal. A eso se debe que, ante la disyuntiva de elegir entre músculo y cerebro, la evolución haya optado más por la fuerza que por la inteligencia, al menos en términos generales. Y esto es también lo que explica que haya tan pocas especies en las que prepondere la vertiente cerebral. Algunas especies se muestran tan desdeñosas con las facultades del cerebro que lo tratan como si fuera un lujo prescindible. Algunas especies de babosas de mar, en su fase juvenil, disponen de un cerebro minúsculo del que se sirven mientras recorren los mares en busca de una posición privilegiada en la que afianzarse para tamizar el alimento que el agua pone a su alcance. Sin embargo, en cuanto

hallan un objeto al que encaramarse dejan de necesitar tan costoso pertrecho, así que... ¡lo devoran! (Hay quien aprovecha esta circunstancia para bromear cruelmente y asegurar que eso es parecido a lo que les pasa a los profesores titulares.)[4]

Sea como fuere, da la impresión de que el cerebro de los primates vale lo que cuesta. Es preciso emplearlo para manejar esas manos y pies tan hábiles. Y en un conjunto de especies que lo fían casi todo a la vista, también son necesarios para procesar las imágenes (¿eso que veo a tres árboles de distancia, es o no es una ciruela madura?), puesto que las imágenes consumen buena parte de la capacidad de tratamiento de datos del cerebro, tal como sucede en los ordenadores. Y lo que es aún más importante, los primates son sociables, pues la vida en grupo les confiere protección y apoyo. La presión que tendía a animar a los primates a integrarse en bandas muy numerosas aumentó cuando empezaron a desenvolverse en terrenos abiertos y expuestos a diversos peligros —como el de las extensas praderas y zonas boscosas del mundo surgido tras el Máximo Térmico del Paleoceno-Eoceno, marcado por la tendencia del clima al enfriamiento—. Para poder vivir satisfactoriamente en compañía de otros miembros de nuestra propia especie es preciso controlar las constantes variaciones que experimentan las relaciones entre los miembros de la familia y el grupo de amigos (o de los eventuales enemigos). ¿Quién ocupa los escalones superiores de la jerarquía, y quién los inferiores? ¿Quién se comporta de un modo amistoso y quién no? ¿Quién me debe favores, y con quién estoy en deuda? Dar respuesta a estas preguntas exige llevar a cabo un conjunto de cálculos cuya complejidad aumenta de forma exponencial y directamente proporcional al tamaño de los grupos. Si solo lo integran tres individuos, quizá sea fácil salir al paso de los contratiempos. Pero si lo componen cincuenta o cien, los cálculos serán muchísimo más delicados.

Para vivir en grupo, también es imprescindible percatarse mínimamente de lo que debe de estar sucediendo en el cerebro de los demás. Intuir los pensamientos y los sentimientos de nuestros semejantes podría haber sido un paso muy importante en el camino hacia la conciencia, es decir, hacia un conocimiento más cabal de lo que ocurre en nuestra propia mente.[5] La minuciosa observación de las agrupaciones de los primates muestra que, si un individuo se equivoca en los cálculos sociales, es muy probable que coma menos, esté más desprotegido, reciba golpes a menudo, vea reducidas sus oportunidades de conservar la salud y disminuyan sus probabilidades de tener una descendencia sana.[6] Parece por tanto que, en la historia de los primates, las facultades de la sociabilidad, la cooperación y la capacidad intelectual han evolucionado juntas. De hecho, parece existir cierta correlación entre el tamaño de los grupos de primates y las dimensiones de su cerebro. En apariencia, fueron muchos los linajes de primates que se mostraron dispuestos a pagar un tributo entrópico más, el impuesto al cerebro, si eso les permitía vivir en grandes grupos.

Es probable que las especies con las que se inició el orden de los primates evolucionaran antes de que se consumara la desaparición de los dinosaurios, pero los restos más antiguos de los primates que sobrevivieron al episodio de extinción masiva provocado por el asteroide se fosilizaron varios millones de años después del impacto de Chicxulub. Los seres humanos pertenecemos al gran grupo de primates sin cola que reciben el nombre de «simios», que evolucionaron hace unos treinta millones de años y prosperaron y se diversificaron en África y Eurasia hace veinte millones de años. En la actualidad, la familia de los grandes simios (u homínidos) la integran, entre otros, los orangutanes, los gorilas y los chimpancés; y por supuesto, los seres humanos. Sus antepasados se desarrollaron en el mundo surgido tras el Máximo Térmico del Paleoceno-Eoceno, en el que los niveles de dióxido de carbono disminuyeron y reinaba un clima más frío y menos predecible que el de nuestros días. La inestabilidad climática pisó con fuerza el

acelerador de la evolución, lo que obligó a muchas y muy distintas especies a adaptarse apresuradamente. Hace unos diez millones de años los climas empezaron a volverse más secos y más fríos en buena parte de los ecosistemas que ocupaban los grandes simios, de modo que el linaje de los simios fue quedando diezmado, quizá de forma muy severa, a medida que las praderas fueron sustituyendo los hábitats boscosos en que se habían establecido. Nuestros antepasados directos descienden de los géneros que lograron sobrevivir a este empuje que llevó a la evolución a avanzar a marchas forzadas.

Antes de la década de 1970, las pruebas fósiles disponibles indujeron a muchos paleontólogos a convencerse de que la rama de los seres humanos se había desgajado de la del resto de los simios hace un mínimo de veinte millones de años, pero en 1968, los genetistas Vincent Sarich y Allan Wilson habían mostrado que podía fecharse el momento en que se produce la divergencia de dos especies mediante la comparación del ADN de los respectivos ejemplares que continúan vivos en la actualidad. Esto es posible gracias a que hay grandes porciones de ADN, sobre todo si pertenecen al grupo de las que no codifican genes, que cambian aleatoriamente y a un ritmo relativamente constante. Las comparaciones genéticas basadas en esta intuición mostró que los seres humanos, los chimpancés y los gorilas compartieron un mismo antepasado hasta hace poco, apenas unos ocho millones de años (punto en el que los predecesores de los gorilas modernos decidieron seguir tan campantes por otro camino). Los seres humanos y los chimpancés tuvieron un antepasado común hasta hace unos seis o siete millones de años. En otras palabras: hace seis o siete millones de años, existió en alguna parte de África una criatura de la que descienden tanto los seres humanos modernos como los chimpancés. Todavía no hemos podido encontrar restos fósiles de ningún individuo de ese género, pero la genética nos indica que existió de verdad.

Los chimpancés modernos y los seres humanos actuales todavía comparten más del 96 % de sus genomas. Sin embargo, dado que cada genoma cuenta con unos tres mil millones de pares de bases, esto significa que poseemos unos treinta y cinco millones de letras diferentes en el código genético (pues eso vienen a ser los pares de bases). Las claves que pueden revelarnos por qué los humanos y los chimpancés han tenido una historia evolutiva tan radicalmente divergente, sobre todo en los últimos miles de años, se hallan ocultas entre esos caracteres distintos del código genético. ¿Por qué hoy nuestros parientes más cercanos han quedado reducidos a un conjunto de poblaciones de carácter residual, integradas por unos cuantos cientos de miles de individuos, mientras que en nuestros días los seres humanos, además de constituir una masa de más de siete mil millones de personas, somos también la especie que domina la biosfera?

La historia de los homininos: ¿cuándo aparecieron los primeros seres humanos?

Todas las especies que caen en la vertiente humana de la línea divisoria evolutiva que separa a nuestro propio linaje del de los chimpancés se agrupan bajo un mismo epígrafe: los «homininos». En los últimos cincuenta años, los paleontólogos han encontrado restos fósiles de tal vez unas treinta especies de homininos, aproximadamente, aunque podrían ser algunas más (y en ocasiones todo lo hallado se reduce al hueso de un dedo o a un simple puñado de dientes). Digo que «tal vez» sean de unas treinta especies distintas porque los paleontólogos no han consensuado una definición de lo que es efectivamente una especie distinta. Algunos de estos científicos tienden a «separar», pues consideran que hay muchas especies de homininos diferentes. Otros prefieren, por el contrario, «agrupar», debido a que ven menos especies marcadas por grandes variaciones internas. En la actualidad, somos la única

especie viva de hominino. Esto es muy poco corriente, porque en una época muy reciente —es decir, hace tan solo veinte mil o treinta mil años— eran varias las especies de homininos diferentes (pero contemporáneas entre sí) que recorrían las sabanas de África y Eurasia. La reciente desaparición de otras especies de homininos, ocurrida en el mismo período en que los seres humanos nos apoderábamos de una creciente cantidad de tierras y recursos, es una señal de lo peligrosos que podemos llegar a ser.

En los últimos cincuenta años, los paleontólogos han llenado sus maletines de un abundante y novedoso surtido de juguetes forenses y trucos científicos que les han ayudado a completar de forma más detallada la historia de los homininos. Los dientes fosilizados resultan particularmente informativos. Eso está muy bien, porque es muy frecuente que los dientes sean los únicos restos que salen a la luz. Tal como ocurre cuando tu dentista te dice que puede saber sin dificultad si has comido palomitas de maíz, chocolate o helado, también los paleontólogos especializados en la dentición se encuentran en condiciones de afirmar si nuestros antepasados seguían un régimen carnívoro o vegetariano. La forma de un diente puede indicarnos si se utilizaba para cortar o masticar los alimentos, circunstancia que nos ofrece una gran cantidad de información. Para alimentarse de frutos secos es preciso disponer de dientes capaces de triturarlos, como las muelas, mientras que la carne exige contar con piezas dentales cortantes, como los caninos.

Los rastros químicos que encontramos en los huesos y en los dientes también pueden revelarnos muchas cosas sobre la dieta y el estilo de vida de aquellos primeros homininos. Por ejemplo, los vegetales que realizan la fotosíntesis de tipo C_4, como las hierbas y los juncos, absorben una mayor cantidad de carbono 13, un isotopo del carbono más pesado que el carbono 12, que sin embargo es más común. El análisis de los dientes del *Australopithecus africanus*, que deambulaba por ahí hace unos 2,5 millones de años, muestran unos niveles de carbono 13 más altos de lo esperado, y como tenemos la certeza de que no comían hierba (ningún simio puede digerirla), eso

nos induce a pensar que se alimentaban con carne de animales que sí pastaban. Y el hecho de que fuesen carnívoros nos lleva a una de estas dos conclusiones: o bien eran carroñeros, o bien se dedicaban a la caza, y es posible que utilizaran incluso algunas herramientas de piedra.

El análisis químico de los isotopos de estroncio presentes en los restos óseos puede llegar a indicarnos las dimensiones del territorio en que se movían los individuos de esta especie.[7] El análisis de los huesos de un grupo de homininos primitivos conocidos como «australopitecinos» ha demostrado que las hembras viajaban más que los machos, lo que parece señalar que eran las hembras las que se unían a los grupos de machos y no al revés. En otras palabras, sus comunidades eran patrilocales, como las de los chimpancés modernos, lo que nos da mucha información sobre su universo social. Todas estas herramientas facilitan la detectivesca labor de los investigadores pero, por desgracia, nos suelen proporcionar más interrogantes que respuestas, lo que al menos tiene la virtud de recordarnos cuán compleja es en realidad la historia de la evolución humana.

El registro fósil de los homininos es hoy mucho más abundante que antes. En 1900, los antropólogos solo disponían de los restos fósiles de dos tipos de humanos antiguos: los neandertales, cuyo primer ejemplar se encontró en Alemania en 1848, y los del *Homo erectus*, descubierto en 1891 en Java por el paleoantropólogo holandés Eugène Dubois. Estos hallazgos señalaban que los seres humanos se habían desarrollado en Europa o en Asia. Sin embargo, en 1924, Raymond Dart, profesor de anatomía australiano afincado en Sudáfrica, dio con los restos fosilizados del primer hominino africano auténticamente relevante. Se trataba de una calavera rodeada de un conjunto de fósiles, y resultó ser el cráneo de un niño de una especie a la que hoy denominamos *Australopithecus africanus*, que a su vez forma parte del vasto grupo de especies australopitecinas originalmente aparecidas hace unos cinco millones de años. Como consecuencia de este hallazgo, África se convirtió en

el escenario de frecuentes descubrimientos de fósiles de homininos, de modo que en nuestros días la mayoría de los paleoantropólogos creen que nuestra especie evolucionó en algún punto de ese continente. En los años treinta del siglo pasado, Louis y Mary Leakey empezaron a encontrar fósiles y artefactos de homininos en el valle del Rift, una región en la que el magma ascendente que presiona el manto terrestre ha empezado a resquebrajar la placa tectónica en la que se asienta casi toda África. Al final acabará abriéndose un nuevo mar en la zona. Pero mientras tanto, las grietas que recorren la placa tectónica africana permiten a los buscadores de fósiles vislumbrar algunos destellos del lejano pasado de nuestra especie.

En 1974, Donald Johanson descubrió en Etiopía el 40 % del esqueleto de otra especie de australopitecino, el *Australopithecus afarensis*. Los restos se atribuyeron a un individuo de sexo femenino al que se dio el nombre de Lucy, y se calculó su antigüedad en unos 3,2 millones de años. Se han encontrado también fósiles de otros australopitecinos cuya antigüedad es ligeramente inferior a los cuatro millones de años. Desde entonces, también en otras partes de África se han hallado varias especies de homininos anteriores, dado que vivieron hace cuatro o cinco millones de años (como por ejemplo el *Ardipithecus*), e incluso alguna se remonta a un período situado seis millones de años atrás (el *Orrorin tugenensis*). Incluso es posible que exista una de siete millones de años (*Sahelanthropus tchadensis*), lo que sitúa a esa especie en una fecha muy cercana a la que teóricamente asistió a la evolución del último ancestro común de todos los homininos.

Son tan pocos los fósiles de los primeros homininos que han salido a la luz que un solo nuevo descubrimiento podría bastar para alterar por completo el relato vigente. Ni siquiera tenemos la certeza de que los fósiles más antiguos pertenezcan realmente a los homininos, y tampoco ha podido establecerse siempre inequívocamente si los restos fosilizados de un par de individuos dados pertenecen o no a dos especies diferentes. ¿Deberíamos asignar a géneros diferentes los especímenes hallados de *Homo*

habilis y *Homo erectus*, dado que el tamaño del cerebro de estas dos especies es muy diferente, o debería considerarse que el *Homo habilis* es el último de los australopitecinos? Nuestra comprensión de la historia de los primeros homininos sigue siendo bastante incompleta, pero al menos algunas secciones de la trama general están empezando a verse con mayor nitidez.

Parece que todas las especies de homininos eran bípedas, hasta las más primitivas, aunque en algunos casos solo ocasionalmente caminaran así. Esta forma de deambular difiere mucho de la de los chimpancés y los gorilas, que andan apoyándose en los nudillos. El examen de los huesos puede indicarnos si una especie se desplazaba erguida o no. En las especies bípedas, el dedo gordo del pie ha dejado de utilizarse para funciones prensiles, así que aparece más alineado con los demás dedos y más próximo a ellos, mientras que, por otro lado, la espina dorsal encaja en el cráneo por abajo, y no por detrás (si se pone a cuatro patas, entenderá el porqué). El hecho de progresar afianzándose solo en dos piernas exigió una serie de reestructuraciones en la espalda y las caderas, además de en la caja craneana. También propició el surgimiento de unas caderas más estrechas, lo que no solo dificultó el parto y lo volvió más peligroso, sino que quizá signifique que, en muchos casos, los homininos alumbraban criaturas insuficientemente desarrolladas e incapaces de sobrevivir por sí solas, como nos ocurre hoy en día a nosotros mismos. Esto debió de conllevar que los bebés requirieran un período de cuidados parentales más largo, circunstancia que a su vez pudo estimular la sociabilidad y determinar que, en cuanto se convertían en padres los homininos machos se implicaran más en la crianza de los hijos. Los efectos indirectos de la bipedestación fueron muy numerosos, pero aún no sabemos con exactitud cuáles fueron las presiones evolutivas que llevaron a los homininos a adoptar esa modalidad de locomoción. Tal vez la bipedestación permitiera a nuestros antepasados salvar mayores distancias andando o corriendo, sobre todo teniendo en cuenta que habitaban las sabanas cubiertas de hierbas que predominaban en ese mundo de los últimos

treinta millones de años, característicamente sometido a un gradual proceso de enfriamiento. Por otro lado, también liberó y humanizó las manos hasta conseguir que se especializaran en la realización de tareas como la manipulación de objetos, de entre las que destaca la producción de herramientas.

Nada indica que los primeros homininos tuvieran una inteligencia fuera de lo común en comparación con los primates. Sus cráneos no solo contenían un cerebro mucho menor que el nuestro, sino que se asemejaba más al de los chimpancés, pues su volumen oscilaba entre los 300 y los 450 centímetros cúbicos. Para hacernos una idea de lo que esto representa podemos contrastar ese volumen con el de nuestros propios cerebros, que por término medio rondan los 1.350 centímetros cúbicos. Aun así, más que el tamaño absoluto del cerebro, lo significativo es el grado de desviación que muestran las dimensiones de dicho órgano respecto del que cabría esperar en función del peso corporal medio de un particular grupo de organismos —aunque, desde luego, no se trate de una magnitud fácil de calcular—. Es lo que se denomina «coeficiente de encefalización» o EQ (por sus siglas en inglés: *Encephalization Quotient*). El valor del EQ de los chimpancés es aproximadamente 2 (comparado con el de otros mamíferos), y los seres humanos modernos tenemos un EQ de 5,8, cifra que es extraordinariamente elevada. El EQ de los australopitecinos se encuentra en una horquilla comprendida entre 2,4 y 3,1.[8] La primera característica distintiva de los homininos no fue ni la inteligencia ni una relación cerebro-cuerpo extraordinaria. La bipedestación, sí.

Los primeros fósiles que actualmente se clasifican como restos pertenecientes a nuestro propio género, denominado *Homo*, es el de una especie conocida con el nombre de *Homo habilis* que vivió en África entre –2,5 y –1,5 millones de años. La primera prueba de la existencia de esta especie consistió en el hallazgo en 1960 de una mandíbula y unos cuantos huesecillos de la mano, como consecuencia de las investigaciones llevadas a cabo por Mary Leakey y su hijo Jonathan en la garganta del río Olduvai, en pleno valle del

Rift. La íntima asociación de los restos encontrados y las herramientas de piedra de los alrededores convenció a los Leakey de que era preciso clasificar a la especie recién descubierta como una nueva forma de *Homo*, que es el modo que los paleontólogos tienen de decirnos: «Creo que estos fósiles son de unos seres verdaderamente humanos porque fabricaban herramientas».

Pero ¿eran realmente como nosotros? ¿Es este el punto de arranque de la historia de la humanidad? En nuestros días, la mayor parte de los investigadores ven con escepticismo la posibilidad de que exista un género *Homo* bien diferenciado y capaz de incluir a un tiempo a los seres humanos y al *habilis*. A fin de cuentas, el volumen cerebral del *habilis* apenas superaba al de los australopitecinos, pues se situaba entre los 500 y los 700 centímetros cúbicos, con un coeficiente de encefalización establecido en 3, lo que no se sale demasiado de lo corriente. Además, la obtención de sus herramientas de piedra no implicaba más proceso que el consistente en aplastar un pedrusco para poder utilizar los fragmentos resultantes. Si tenemos en cuenta que es muy probable que algunas especies de australopitecinos conocieran la tecnología lítica y que los chimpancés también son capaces de utilizar algunos instrumentos (aunque no de piedra), da la impresión de que el parecido del *Homo habilis* con los australopitecinos es lo suficientemente grande como para justificar que se le incluya en la misma clase. El empleo de herramientas no los convierte en seres humanos, porque hoy sabemos que la fabricación de utensilios no es exclusiva de nuestra especie.

La historia reciente de los homininos: los últimos dos millones de años

Hace dos millones de años, a comienzos del Pleistoceno, empezamos a encontrar especies de homininos que no solo eran más altas y estaban provistas de un mayor cerebro, sino que eran además capaces de producir instrumentos líticos más refinados y de

explotar una mayor diversidad de entornos. Probablemente no debamos considerar casual que su aparición coincidiera con el descenso de las temperaturas y la disminución de las precipitaciones. Por regla general, se tiende a clasificar a estas especies bajo los epígrafes de *Homo erectus* o de *Homo ergaster*, pero en lo que sigue utilizaré el término *Homo erectus* para referirme a la totalidad de los homininos de este período.

La gran masa del encéfalo del *Homo erectus* resulta llamativa porque, como ya hemos visto, los cerebros son máquinas evolutivas de mantenimiento muy caro. De hecho, la velocidad a la que aumenta el tamaño del cerebro en relación con el peso corporal de los homininos supera los ritmos de crecimiento encefálico de cualquier otro grupo de especies de la historia evolutiva.[9] En este sentido, cabe pensar que el elemento impulsor de ese incremento pudo ser la sociabilidad. La importancia de los cálculos mentales relacionados con la vida social queda claramente de manifiesto en la estructura del cerebro humano, que dedica un excepcional número de conexiones neuronales a ese tipo de cómputos. Es posible que la presencia de un mayor número de neuronas signifique tener más amigos, más comida, gozar de mejor salud y mejores oportunidades de reproducción. Desde luego, es indudable que contar con un cerebro mayor que el de sus antecesores permitió a los homininos vivir en grupos más amplios y construir redes de relaciones más densas.[10] La mayoría de los primates, incluidos los chimpancés y los babuinos, vivían en grupos inferiores a los cincuenta individuos, y en líneas generales puede decirse que, a menor cerebro, menor grupo. Ahora bien, las dimensiones de los grupos de homininos crecieron a un ritmo acorde con el incremento de volumen que experimentó su cerebro en el curso de los últimos dos millones de años. Así pues, es probable que el *Homo erectus* fuera la primera especie de homininos capaz de desenvolverse en grupos compuestos por más de cincuenta individuos.

En 1891 el anatomista holandés Eugène Dubois encontró en la isla de Java los primeros restos de *Homo erectus*. Su decisión de investigar en Indonesia respondía a su presentimiento de que los seres humanos no descendían de los chimpancés africanos (según la hipótesis que había propuesto Darwin), sino de los orangutanes asiáticos. En este sentido su corazonada era errónea. Sin embargo, los restos que encontró sí pertenecían a individuos dotados de un cerebro de casi 900 centímetros cúbicos, lo que se aproxima ya muchísimo más a la media del humano moderno, que se sitúa, como ya hemos señalado, en torno a los 1.350 centímetros cúbicos. Además se estableció que su coeficiente de encefalización oscilaba entre 3 y 4. El hecho de que los fósiles se descubrieran en Java también mostraba que el *Homo erectus* disponía de la tecnología y la destreza necesarias para abandonar África y culminar una ruta migratoria que le obligó a recorrer buena parte de la Eurasia meridional. Con todo, no se trata de una proeza que deba impresionarnos en exceso. Otras muchas especies, como los leones, los tigres, los elefantes e incluso algunos de nuestros parientes más cercanos (los orangutanes), también habían completado migraciones similares (debido, dicho sea de paso, a que muchos de los entornos que existen en el sur de Eurasia no difieren demasiado del medio ambiente que predomina en África). De hecho, las pruebas recientes sugieren que las especies íntimamente relacionadas con el *Homo habilis* podrían haber viajado a regiones muy alejadas de sus puntos de origen, por ejemplo hasta Indonesia, convirtiéndose así en los antepasados de los diminutos homininos que conocemos como *Homo floresiensis* (apodado «el Hobbit»), que hasta hace apenas sesenta mil años todavía vivían en la isla de Flores.[11]

Los *Homo erectus* eran más altos que los *Homo habilis*, y algunos de ellos igualaban la talla de los humanos actuales. También cultivaban una industria lítica más primorosa que la de los *Homo habilis*: me refiero a las hermosas y bien diseñadas herramientas de piedra que conocemos con el nombre de «hachas del achelense». Es posible que disponer de unos utensilios de piedra más

perfeccionados permitiera al *Homo erectus* ingerir una mayor cantidad de carne, una fuente de alimento imprescindible, ya que su elevado contenido energético habría procurado a su cerebro, en plena expansión, el combustible necesario para continuar creciendo. También es posible que aprendieran a manejar, controlar y utilizar el fuego, cosa que le habría dado la oportunidad de explotar una inmensa y novedosa fuente de energía. El primatólogo Richard Wrangham sostiene que el *Homo erectus* empleaba el fuego para cocinar la carne y otros alimentos (lo que significa que se valía de él para predigerir y eliminar la toxicidad de cuanto comía). Esto habría incrementado la gama de alimentos útiles, pues son muchos los que se revelan indigestos o venenosos si no se cocinan. Esta forma de preparar la comida habría reducido asimismo el tiempo que dedicaban a masticar y a digerir lo que les servía de sustento.

Además, que usaran fuego pudo tener también otras consecuencias importantes. Por ejemplo, cocinar reduce el esfuerzo de digestión que se exige a los intestinos, de modo que el tamaño de estos disminuyó (y, sí, en efecto, tenemos pruebas fósiles que lo demuestran), lo que permitió liberar parte de la energía hasta entonces dedicada al metabolismo y aplicarla al desarrollo de esos cerebros en expansión. Hasta ahora no se ha conseguido probar esta interesante hipótesis, porque la antigüedad de los datos determinantes, susceptibles de acreditar que los seres humanos consiguieron controlar sistemáticamente el fuego, es solo de ochocientos mil años —y no olvidemos que hasta hace cuatrocientos mil no se observa que el fuego constituya un recurso verdaderamente habitual—.[12] También sabemos que las tecnologías líticas del *Homo erectus* se mantuvieron con muy pocos cambios durante un millón de años, así que todo parece indicar que el *Homo erectus* carecía tanto del olfato tecnológico como de la creatividad que tanto caracterizan a nuestra propia especie.

En el último millón de años, la evolución de los homininos ha venido experimentando una notable aceleración. Hace unos seiscientos mil años, los registros fósiles señalan la aparición de una

serie de especies nuevas, todas ellas provistas de cerebros y cuerpos cada vez más parecidos a los de los seres humanos actuales. Como era de esperar, parece que también vivían en grupos de gran tamaño, pues contaban con unos ciento cincuenta individuos; y es preciso subrayar que esta cifra debió de constituir el límite máximo para nuestros predecesores de la rama de los homininos.[13]

Los debates en los que se intenta dirimir cuántas especies de homininos diferentes existían hace medio millón de años son muy complejos. Sabemos que había muchos linajes distintos. Sin embargo, lo más importante es la tendencia a largo plazo: hoy somos conscientes de que, durante las glaciaciones del Pleistoceno medio, hubo homininos tanto en Europa como en el norte de Asia, entornos muy diferentes de la sabana africana y que exigían el dominio de un conjunto de habilidades y tecnologías totalmente nuevas. Por consiguiente, no debe sorprendernos que sus herramientas fueran más complejas, variadas y especializadas que las del *Homo erectus*. En esta época se observa por primera vez que los homininos rematan con una punta de piedra un astil de madera. En Schöningen, Alemania, los arqueólogos han encontrado lanzas de madera de cuatrocientos mil años antigüedad, todas ellas fabricadas con gran precisión y minucia. Algunos antropólogos han llegado a detectar incluso pruebas de una balbuciente actividad artística y ritual. Entre los diversos hallazgos que debemos a Eugène Dubois se cuenta un conjunto de conchas de mejillones decoradas hace quinientos mil años, y lo cierto es que presentan un aspecto sospechosamente similar al de una sencilla expresión artística.

Aun así... ninguna de estas cosas resultaría verdaderamente revolucionaria, ya que para asistir a unos cambios auténticamente espectaculares habría que esperar a una época aún más reciente, hasta el momento en el que aparece nuestra propia especie (el *Homo sapiens*), hace unos doscientos mil o trescientos mil años.

¿En qué consiste nuestra diferencia? La superación del sexto umbral

Imaginemos que un equipo de científicos extraterrestres dedica una larga temporada a orbitar nuestro planeta en busca de vida inteligente y para estudiar las formas de vida de la Tierra en el marco de un proyecto de investigación longitudinal destinado a prolongarse por espacio de varios millones de años. Por más atención que hubieran puesto en ello, lo cierto es que hace doscientos mil años no habrían detectado nada insólito en nuestros antepasados. Quizá descubrieran, tanto en África como en algunas regiones de Europa y Asia, varias especies de grandes primates bípedos, y que entre ellas se encontraran grupos de las especies que denominamos *Homo neanderthalensis* y *Homo heidelbergensis*. Hasta existiría la posibilidad de que vieran esa clase de individuos que los paleontólogos humanos catalogan como *Homo sapiens*, puesto que el cráneo más antiguo al que habitualmente se incluye ya en nuestra propia especie tiene casi doscientos mil años. Se encontró en el valle del río Omo, en Etiopía, que forma parte de la región del Rift. (En junio de 2017, se estimó en trescientos mil años la antigüedad de unos restos humanos hallados en Marruecos, pero la exacta relación que pueda vincularlos con nuestra especie sigue siendo incierta.) Sea como fuere, habría muy pocas cosas en las que fijarse para distinguir a estos primeros seres humanos de las otras muchas especies de primates existentes, fueran grandes o medianas, o aun de otros mamíferos. Vivían en pequeñas comunidades nómadas diseminadas, y su población total se reducía, en el mejor de los casos, a unos cuantos cientos de miles individuos. Además, como todos los animales grandes, obtenían en su entorno la comida y la energía que necesitaban, tanto por medio de la recolección como de la caza.

En la actualidad, transcurridos ya doscientos mil o trescientos mil años desde esa época (apenas un suspiro para cualquier paleontólogo), los extraterrestres de los que hablábamos al principio, embarcados aún en su espacial circunvalación de la Tierra y en la búsqueda de vida inteligente, habrían asistido ya a tantos cambios en la conducta de esta especie en particular que no podría

reprocháreseles que se dieran unos cuantos apretones de manos para felicitarse por su erudición. Habrían observado la vasta dispersión de los seres humanos a lo largo y ancho del mundo. Más tarde, hace diez mil años —es decir, a finales de la última era glacial—, habrían constatado el inicio de un proceso marcado por el rápido incremento de la población humana. También habrían advertido que los individuos de nuestra especie empezaban a transformar su entorno para adaptarlo a sus necesidades, y que, incitados por ellas, se dedicaban a quemar bosques, desviar cursos de agua, roturar campos y construir pueblos y ciudades de muy diverso tamaño. En los últimos doscientos años, la demografía humana ha alcanzado cifras superiores a los siete mil millones de individuos, y nuestra especie ha comenzado a modificar drásticamente los mares, las tierras emergidas y la atmósfera. Como resultado de nuestra febril actividad, el zigzag de las carreteras, los canales y las vías férreas se expande por todos los continentes y enlaza los miles de ciudades que hemos levantado, muchas de las cuales cuentan con poblaciones de varios millones de individuos. Hay barcos inmensos que surcan los océanos y aviones que transportan mercancías y personas por los aires, aunque para ello deban realizar viajes intercontinentales. Hace tan solo cien años, el destello de un creciente número de filamentos luminosos creaba charcos de luz en la noche terrestre. Los instrumentos de nuestros alienígenas habrían comenzado a indicarles que la acidez del agua de los océanos se intensificaba, que la temperatura de la atmósfera se hallaba en ascenso, que los arrecifes de coral morían y que los casquetes polares se estaban derritiendo. Y finalmente, al constatar además que la biodiversidad se deterioraba a pasos agigantados, algunos de los biólogos llegados de otro planeta se preguntarían si la Tierra no estaría al borde de otra fase de extinción masiva.

En términos paleontológicos, estos cambios tan acelerados son una suerte de explosión. Sin querer, es decir, sin planificación previa, nos hemos convertido en una especie capaz de transformar el planeta. Y si, en el colmo de la insensatez, se nos ocurriera lanzar

alguno de los mil ochocientos misiles nucleares que actualmente permanecen en estado de máxima alerta, tendríamos en nuestras manos incluso la absurda posibilidad de destruir en pocas horas gran parte de la biosfera. En los cuatro mil millones de años de historia de la vida, nunca una sola especie ha dispuesto de semejante poder.

Es obvio que se ha cruzado un nuevo umbral. Es más que posible nuestros científicos extraterrestres se preguntaran: «Pero ¿qué le pasa a esta extraña especie?».

Hace mucho tiempo que los historiadores, antropólogos, filósofos y eruditos de otros muchos campos del saber se esfuerzan denodadamente en despejar esta misma incógnita. Algunos de ellos tienen la sensación de que la interrogante no solo es extremadamente compleja, sino también demasiado profunda, lo que añadido a sus múltiples facetas e implicaciones, impide darles una respuesta científica. Sin embargo, lo curioso del caso es que si contemplamos la historia del ser humano como un simple fragmento de la mucho más vasta historia de la biosfera y el universo, las características distintivas de nuestra especie resaltan de pronto con mucha mayor claridad. En nuestros días muchos estudiosos de diversas áreas de conocimiento parecen empezar a señalar de manera coincidente las causas de lo que nos hace diferentes, lo que significa que están respondiendo de manera similar a esa pregunta crucial.

Siempre que tengamos que analizar una serie de transformaciones tan súbitas y tajantes como esta, lo mejor es que busquemos cambios diminutos capaces de generar consecuencias de enorme alcance. Tanto la teoría de la complejidad como la del caos, vinculada con ella, forman parte de un área de conocimiento en la que se estudia un gran número de cambios como este, y es frecuente describir esos bruscos vuelcos con la expresión «efecto mariposa». Fue el meteorólogo Edward Lorenz quien acuñó la metáfora al señalar que, en los sistemas climáticos, un acontecimiento insignificante (digamos, el aleteo de una mariposa...) podría acabar amplificándose como resultado de una serie de ciclos

de retroalimentación positiva, dado que estos tienen la facultad potencial de generar una cascada de transformaciones capaces de provocar a su vez el desencadenamiento de un ciclón a miles de kilómetros de distancia. Por consiguiente, la pregunta es: ¿cuáles fueron los minúsculos cambios que desataron el tornado de la historia humana?

Son muchas y muy diversas las características que integran el paquete de prestaciones básicas del ser humano, desde nuestra notable habilidad manual hasta el gran cerebro y la sociabilidad que nos definen. Sin embargo, lo que nos hace radicalmente singulares es nuestra capacidad de controlar de manera colectiva la información procedente del entorno. No nos limitamos a reunir información, como sí hacen otras especies. Da la impresión de que la cultivamos y la domesticamos, procediendo del mismo modo que los granjeros para que prosperen sus cosechas. Generamos y compartimos un volumen de información creciente, y la utilizamos para explotar un conjunto de flujos de energía y recursos en constante aumento. La facultad de gestionar información nueva permitió que los seres humanos pudieran utilizar mejores lanzas, arcos y flechas, lo cual les permitió a su vez cazar animales de mayor tamaño, y hacerlo además de una forma más segura. También les llevó a servirse de embarcaciones mejoradas, gracias a las cuales consiguieron aprovechar la riqueza piscícola de nuevos caladeros y colonizar tierras inexploradas. Esto último les dio ocasión de adquirir nuevos conocimientos de botánica, y esto les dio oportunidades alimenticias inéditas, como la que se abrió ante ellos al eliminar las toxinas de ciertas plantas potencialmente comestibles, como por ejemplo la mandioca. Y ya en tiempos más modernos, la información novedosa es la que subyace a las tecnologías que nos permiten aprovechar la energía de los combustibles fósiles y construir redes electrónicas, lo que en último término nos ha convertido, con el establecimiento de los recientísimos puentes de unión virtuales, en un único sistema mundial.

La capacidad de gestionar la información a semejante escala es un logro que no puede atribuirse a la acción de ningún individuo en particular. Tal hazaña se ha conseguido porque hemos compartido y acumulado millones de intuiciones personales a lo largo de un gran número de generaciones. Al final, comunidad a comunidad, esta puesta en común ha terminado creando lo que el geólogo ruso Vladímir Vernadski llamó en su día la «noosfera»: un mismo ámbito global de reflexión, cultura, pensamientos e ideas compartidos. Según sostiene el psicólogo evolutivo estadounidense Michael Tomasello, «no conocemos más que un único mecanismo biológico susceptible de producir este tipo de cambios de comportamiento y cognición en tan corto espacio de tiempo [...]. Ese mecanismo biológico es la transmisión social o cultural, que opera a unas escalas temporales cuya velocidad supera en mucho el ritmo que siguen las de la evolución orgánica». Este proceso, al que Tomasello denomina «evolución cultural acumulativa», es exclusivo de nuestra especie.[14]

El minúsculo cambio que permitió que los seres humanos compartiéramos y acumuláramos tantísima información fue de orden lingüístico. Muchas especies disponen de un lenguaje: los pájaros y los babuinos pueden advertir a los demás miembros de su grupo de la presencia en las inmediaciones de un depredador. No obstante, los lenguajes de los animales solo les permiten compartir ideas simples, casi siempre vinculadas a realidades presentes en el contexto más inmediato, un poco como sucede en el caso de la mímica (imagínese por un momento que tiene que enseñar bioquímica o viticultura valiéndose solo de la mímica). Varios investigadores han intentado enseñar a hablar a los chimpancés; de hecho, estos grandes simios pueden adquirir y utilizar vocabularios de cien o doscientas palabras. Incluso logran relacionar parejas de palabras y construir con ellas un vocablo nuevo, pero el léxico que manejan es muy reducido y sus construcciones lingüísticas carecen tanto de sintaxis como de gramática, lo que significa que se hallan desprovistas de las reglas que permiten que los seres humanos generemos una enorme variedad de significados a partir de un pequeño número de símbolos

verbales. Al parecer, su capacidad lingüística nunca va más allá de la que posee un niño de dos o tres años, y eso no basta para alumbrar el mundo de nuestros días.

Ese fue el punto en que la mariposa batió las alas. El lenguaje humano cruzó un sutil umbral lingüístico, y con ello se abrieron de par en par las puertas de un tipo de comunicación totalmente nuevo. En el caso de los lenguajes humanos, el factor más relevante consiste en que nos permite compartir información sobre entidades abstractas, sobre cosas o posibilidades que no está físicamente presentes e incluso sobre cuestiones que ni siquiera existen al margen de nuestra imaginación; y además de un modo rápido y eficiente. Si exceptuamos a las abejas productoras de miel, cuyas danzas pueden indicar a sus compañeras dónde encontrar néctar, no conocemos a ningún otro animal capaz de transmitir información precisa sobre realidades que no se hallen justo ante sus ojos. Ningún otro ser vivo puede intercambiar relatos vinculados con el futuro o con el pasado, emitir advertencias acerca de la presencia de una manada de leones que deambula quince kilómetros al norte del lugar en el que se produce el aviso, ni contar historias de dioses y demonios. Quizá sean capaces de pensar acerca de tales cosas, pero les resulta imposible comunicarlo. Esto podría explicar que resulte tan difícil encontrar alguna prueba de una verdadera enseñanza en cualquiera de las demás especies, ya que ni siquiera se advierte entre nuestros parientes más próximos, los monos y los simios.[15]

Estas mejoras lingüísticas permitieron a los seres humanos compartir información con una precisión y una claridad tan grandes que el conocimiento comenzó a acumularse de generación en generación. Además de excesivamente limitados, los lenguajes de los animales son también demasiado imprecisos para generar una acumulación de este tipo. Si cualquier especie anterior a la nuestra hubiera tenido esta capacidad lingüística, no hay duda de que habría dejado rastros de su existencia, como, entre otras cosas, una amplia propagación territorial y un impacto creciente en su entorno. De hecho, habríamos hallado el mismo tipo de pruebas que

encontramos en el caso de la historia humana. La potencia del lenguaje humano es tan intensa que logra actuar a la manera de un trinquete: es capaz de fijar las ideas de una generación y preservarlas para la generación siguiente, la cual podrá añadir las suyas.[16] Yo llamo a este mecanismo «aprendizaje colectivo». Su función es impulsar el cambio, y lo cierto es que lo conduce con tanta energía como la propia selección natural. Sus efectos se dejan notar muy rápido, pues posibilita un intercambio instantáneo de la información.

Todavía no entendemos con claridad cómo adquirió nuestra especie las facultades lingüísticas necesarias para poner en marcha este poderoso y nuevo motor de cambio, y tampoco sabemos por qué lo consiguió. ¿Se trató, como sostiene el neuroantropólogo estadounidense Terrence Deacon, de una nueva capacidad destinada a comprimir grandes cantidades de información en el reducido espacio de un símbolo? (Hay palabras en apariencia simples, como «símbolo», que vehiculan una carga informativa enorme.) ¿O fue más bien el desarrollo de los nuevos circuitos gramaticales impresos en el cerebro humano lo que nos ayudó a combinar las palabras mediante una serie de reglas precisas para poder transmitir una gran variedad de significados diferentes, como ha sugerido el lingüista Noam Chomsky? Esta última idea resulta tentadora, pues como dijo el también lingüista Steven Pinker, lo verdaderamente difícil consistía en «diseñar un código capaz de hilar una enmarañada sopa de fideos hecha de conceptos discretos y transformarla en un bramante de palabras continuo y lineal», y hacerlo además con la eficacia suficiente como para que el receptor del mensaje pudiera recrear enseguida la sopa de fideos conceptual partiendo de la hebra lineal.[17] ¿Fue la posibilidad del lenguaje humano una consecuencia directa del mayor espacio neuronal que supuso el crecimiento del córtex? O dicho de otro modo: ¿se debió al hecho de que esa superior holgura se destinara a la reflexión, dado que poseía la facultad de contener pensamientos lo bastante complejos como para formar oraciones sintácticamente complejas o dejar que un individuo

memorizase los significados de miles de palabras?[18] ¿O debemos pensar que las formas perfeccionadas del lenguaje hunden sus raíces en la sociabilidad y en esa disposición a colaborar que aparece tan bien desarrollada en nuestra propia especie?[19] ¿O acaso se produjo un fenómeno de sinergia entre todos estos catalizadores?

Fuera como fuese, todo parece indicar que nuestra especie fue la primera en traspasar ese umbral lingüístico que permite la acumulación de información tanto en el seno de las comunidades como entre las generaciones. Similar en este sentido al hallazgo de una verdadera mina de oro, el aprendizaje colectivo desencadenó la puesta en marcha de una plétora de información sobre las plantas, los animales, la fecundidad de las tierras de cultivo, el fuego, los productos químicos..., sin olvidar que al mismo tiempo nutrió también la literatura, el arte, la religión y la psicología de nuestros propios semejantes. Pese a que en cada generación se perdieran algunos datos, lo cierto es que a largo plazo los almacenes de información de los seres humanos no dejaron de crecer y que el caudal de conocimiento provocó una impresionante aceleración de la historia humana, dado que nos proporcionó acceso a unos flujos de energía en constante aumento y a un poder sobre el entorno igualmente ascendente. Así describe este mecanismo uno de los precursores de los estudios relacionados con la memoria, el premio Nobel Eric Kandel:

> Aunque el tamaño y la estructura del cerebro humano no hayan experimentado cambios desde que apareciera el primer *Homo sapiens* en el África oriental [...], tanto la capacidad de educarse de los individuos humanos como su memoria histórica han ido acrecentándose a lo largo de los siglos gracias al aprendizaje compartido; o dicho de otro modo: han aumentado por medio de la transmisión de la cultura. La evolución cultural, que es un modo de adaptación que no depende estrictamente de la biología, opera de forma paralela a la evolución biológica y actúa como un medio de transmitir tanto el conocimiento del pasado como el comportamiento adaptativo, y esto de generación en generación. Todos los logros humanos, desde la más remota antigüedad hasta la época moderna, son producto de la memoria común que viene acumulándose desde hace siglos.[20]

El gran historiador del mundo William H. McNeill elaboró su clásica historia universal titulada *The Rise of the West* en torno a esta misma idea: «El principal factor que promueve el cambio social históricamente significativo» —afirma—, «es el contacto con personas de otras culturas dotadas de habilidades nuevas y con las que el grupo receptor no está familiarizado».[21]

La vida en el período paleolítico

Por consiguiente, la historia humana se inicia con el aprendizaje colectivo. Pero ¿cuándo empezó esa forma de aprendizaje?

El primer destello de aprendizaje colectivo se produjo hace doscientos mil años, pero fue tan sutil que habría pasado desapercibido ante los ojos de cualquier observador, aunque dispusiera de los avances de nuestros científicos extraterrestres, en su incansable periplo orbital en torno de nuestro planeta. Es posible que ya hubiera algún tipo de aprendizaje colectivo en comunidades tan antiguas como la del *Homo erectus*, pero sus consecuencias no eran aún revolucionarias. El registro arqueológico africano nos indica que hace al menos hace trescientos mil años aparecieron los primeros indicios de una aceleración del cambio tecnológico y que esa transformación se concretó en la elaboración de un conjunto cada vez más refinado de herramientas de piedra, muchas de ellas provistas de un mango.[22] Además, no solo el *Homo sapiens* da muestras de esta creatividad, también los neandertales y la especie de homininos conocida como *Homo heidelbergensis* poseían una inventiva similar. Tal vez todas estas especies estuvieran adquiriendo ya algunas formas perfeccionadas de lenguaje que les estuvieran poniendo tentadoramente al alcance de la mano el umbral 6. Las primeras pruebas de la existencia de actividades de carácter ritual o de manifestaciones simbólicas o artísticas resulta particularmente significativa, pues sugieren que esos antiguos primates eran capaces

de pensar de manera simbólica e incluso de contar relatos protagonizados por seres imaginarios, lo cual podría ser indicio de que las formas modernas del lenguaje ya habían hecho su aparición.

Es posible que por el dintel que daba acceso al aprendizaje colectivo no cupiera más que una sola especie. Existe un mecanismo evolutivo denominado «exclusión competitiva» que sostiene que no hay forma de que dos especies compartan exactamente un mismo nicho ecológico. Al final, una de ellas terminará por expulsar a su rival, ya que para ello solo necesita explotar el mismo espacio de un modo un poco más eficaz. Imaginemos por tanto que varias especies se arremolinaron en su día en las inmediaciones del umbral evolutivo conducente al aprendizaje colectivo. Es lógico pensar que una de ellas fue la primera en cruzarlo y que a partir de ese momento comenzó a exprimir las posibilidades del nuevo hábitat con una gran eficiencia, hasta el punto de que su población aumentó a tal velocidad que las especies competidoras quedaron fuera de combate.[23] De hecho, esto podría contribuir a explicar por qué perecieron nuestros primos homininos más cercanos, como los neandertales, y al mismo tiempo podría aclarar las causas de que otros parientes próximos que todavía viven, como los chimpancés y los gorilas, se hallen en vías de extinción.

Dado que muchas de ellas tienen más de cien mil años de antigüedad, las pruebas relacionadas con el cambio tecnológico y cultural son confusas y de difícil interpretación. El linaje al que pertenecemos comenzó a diseminarse por la geografía africana hace al menos doscientos mil años, lo que podría constituir un indicio de las ventajas que presentaba ya el aprendizaje colectivo.[24] No obstante, en un mundo marcado por la existencia de un gran número de comunidades pequeñas y diseminadas, que en la mayoría de las ocasiones apenas superaban el tamaño una familia extensa, los cambios se verificaban de forma lenta y errática, con el agravante añadido de que podían revertir con suma facilidad. Grupos enteros podían desaparecer del modo más repentino, llevándose consigo los diferentes relatos, tecnologías y tradiciones que su

particular evolución cultural hubiera podido elaborar a lo largo de numerosos siglos. En este sentido, la mayor catástrofe conocida se produjo hace unos setenta mil años. Los datos genéticos muestran que la población de seres humanos cayó de repente hasta quedar reducida a unas pocas decenas de miles de individuos: una cantidad que apenas alcanza para llenar un estadio deportivo de dimensiones moderadas. Nuestra especie quedó al borde de la extinción. Quizá el desencadenante de este desastre fue la gigantesca erupción volcánica del monte Toba, en Indonesia, que lanzó inmensas nubes de ceniza a la atmósfera, lo que bloqueó la fotosíntesis durante varios meses, o quizá años, y puso en peligro a muchas especies de animales de gran tamaño. Sin embargo, poco después, las cifras demográficas de la especie humana empezaron a repuntar: nuestros antepasados se dispersaron y colonizaron nuevas tierras, aún más lejanas, y la maquinaria del aprendizaje colectivo volvió a cobrar vida.

El estudio de los últimos cien mil años nos ha permitido entrever, siquiera fugazmente, el modo de vida de nuestros predecesores, y también nos ha proporcionado pruebas más claras de la efectividad del aprendizaje colectivo. Como todos los animales de considerables dimensiones, nuestros antepasados vivían de la recolección o la caza, ya que esos eran los recursos que encontraban en su entorno. Existía no obstante una crucial diferencia entre estos animales y los primeros seres humanos. Mientras que otras especies cobraban sus presas o reunían frutos y bayas valiéndose de un repertorio de técnicas e informaciones que apenas habían experimentado el menor cambio en el transcurso de sus incontables generaciones, los seres humanos no solo adquirían una creciente comprensión del medio en el que evolucionaban a medida que aseguraban su supervivencia, sino que al mismo tiempo compartían y acumulaban una gran cantidad de información sobre las plantas, los animales, las estaciones del año y los paisajes en que les había tocado vivir.

Gracias al aprendizaje colectivo, la destreza y la eficacia demostrada por las comunidades de seres humanos en la caza y la recolección fue aumentando sin cesar de generación en generación.

Algunos yacimientos paleontológicos nos permiten entrever cómo vivían nuestros lejanos antepasados. En la Cueva de Blombos, en las costas sudafricanas que baña el océano Índico, el arqueólogo Christopher Henshilwood y sus colegas sacaron a la luz unos asentamientos cuya antigüedad nos obliga a retrotraernos entre noventa mil y sesenta mil años. Los habitantes de la Cueva de Blombos se alimentaban de marisco, pescado y otros animales marinos, aunque también consumían mamíferos terrestres y reptiles. Cocinaban en unos fogones bien organizados,[25] fabricaban cuchillos de piedra primorosamente tallados, y usaban unas puntas de hueso con las que es muy probable que remataran los astiles de madera de sus proyectiles, ya que los unían mediante unas colas especialmente preparadas al efecto. Pero tenían además un claro sentido artístico. Los arqueólogos han encontrado piedras de color ocre cubiertas de un conjunto de rasguños o marcas geométricas grabadas, y todo parece indicar que se trataba de símbolos o incluso de caracteres escritos. Los trogloditas de Blombos fabricaban también pigmentos de distintos colores y collares confeccionados mediante el ensartado de abalorios hechos con cáscaras de huevos de avestruz troceadas. Resulta muy tentador considerar todas estas pruebas un signo de que las comunidades de la Cueva de Blombos valoraban a un tiempo el aprendizaje colectivo y la preservación y transmisión de la información, lo cual significaría, casi con toda seguridad, que también preservaban y contaban relatos para resumir los conocimientos de su comunidad.

Es difícil no advertir la similitud de comportamiento con la conducta de las comunidades modernas de recolectores. Y si esas semejanzas no nos inducen a error, podemos suponer la existencia de muchos grupos como los afincados en la Cueva de Blombos, lo que a su vez significa que ya entonces había una gran diversidad de técnicas de recolección y de caza, concebidas y perfeccionadas a lo

largo de numerosas generaciones. Podemos imaginarlos recorriendo sus territorios de asentamiento, unidos por lazos familiares y valiéndose de lenguajes y tradiciones comunes. Es muy probable que también realizaran danzas y cánticos y que contaran historias sobre sus orígenes. Y también podemos tener la certeza casi total que practicaban lo que nosotros, los seres humanos modernos, llamamos religiones.

En el yacimiento arqueológico del lago Mungo, en Australia, las pruebas de una conducta religiosa resultan innegables. Algunos elementos (como el rastro de una cremación y un enterramiento, acompañados de distintos restos humanos) demuestran que hace unos cuarenta mil años ya existían complejos ritos tradicionales. Otros datos hallados en este mismo yacimiento nos recuerdan que las sociedades paleolíticas, al igual que las de los seres humanos actuales, sufrieron períodos tremendamente convulsos, a menudo consecuencia de los impredecibles cambios climáticos de la última glaciación. Después de que los primeros seres humanos se instalaran en la Región de los Lagos Willandra, hace unos cincuenta mil años, se registraron cíclicos períodos de aridez. Hace unos cuarenta mil años, la ausencia de precipitaciones aumentó y las reservas de agua del sistema lacustre comenzaron a menguar.

Veinte mil años después, cuando el planeta pasaba por la fase más gélida de la Edad de Hielo, algunas comunidades humanas se establecieron en algunos entornos de aspecto similar al de la actual tundra, en las estepas de lo que hoy es Ucrania. En ciertos emplazamientos, como el de Mezhirichi, la gente construyó enormes carpas entoldadas valiéndose de pieles extendidas sobre andamiajes hechos con huesos de mamut y los calentó mediante fogones interiores dotados de una suerte de chimenea. Cazaban mamuts y otros animales de gran tamaño y almacenaban la carne en fosos refrigerados para utilizarla durante los largos y rigurosos inviernos. Atrapaban también animales provistos de gruesos pelajes, y para coser las pieles y confeccionar ropas de abrigo fabricaban con hueso unos objetos puntiagudos parecidos a nuestras agujas; y no se

trataba solo de instrumentos de carácter útil, pues también tallaban uno de sus extremos para adornarlo con formas redondeadas. Durante los largos inviernos de la era glacial debieron de ocupar los refugios de Mezhirichi comunidades de más de treinta personas. Además, existen otros asentamientos similares en las inmediaciones de esta misma localidad ucraniana, lo que parece sugerir que entre estos grupos vecinos los contactos eran habituales. Esto indica a su vez que pudo haberse creado un particular tipo de redes: aquellas por las que acostumbra a circular la información importante, es decir, la relativa a las nuevas tecnologías, a las variaciones del clima, a los desplazamientos de los animales y a la disponibilidad de otros recursos (y todo ello acompañado por el intercambio de relatos). También se habría producido un trasiego de personas entre los distintos grupos próximos.

Los restos que dejaron tras de sí las comunidades del Paleolítico ofrecen una imagen borrosa de las sociedades que formaron, pero cada una de esas instantáneas arqueológicas expone ante nuestros ojos todo un universo cultural, con sus narrativas, sus leyendas, sus héroes y sus villanos. A esta panoplia de conceptos se añadía un caudal de conocimientos científicos y geográficos, trufado de tradiciones y rituales destinados a preservar y transmitir a las jóvenes generaciones las destrezas adquiridas en el pasado. Esta acumulación de ideas, costumbres e informaciones es lo que permitió a nuestros antepasados del Paleolítico encontrar la energía y los recursos necesarios para sobrevivir, prosperar y emigrar a regiones cada vez más remotas, pese a vivir en el áspero mundo de la era Glacial.

En nuestros días, las pruebas obtenidas gracias a la extracción de grandes muestras cilíndricas de hielo nos permiten seguir paso a paso, y con notable precisión, los cambios experimentados por la temperatura global en el curso de varios cientos de miles de años. El período Pleistoceno, que abarca los dos millones de años transcurridos desde la aparición del *Homo erectus*, conoció un gran número de eras glaciales. Por regla general duraban unos cien mil

años, y a veces un poco más, aunque en ellos se intercalaban etapas más breves en las que reinaba un clima más suave (llamados «períodos interglaciares»). La época en la que ahora mismo vivimos es un período interglaciar cálido iniciado hace diez mil años, a principios del Holoceno. El período interglaciar anterior se produjo hace unos cien mil años, y es posible que durara veinte mil años o más. Al terminar ese último ciclo templado, las temperaturas globales iniciaron un descenso gradual pero sostenido, acompañadas de una disminución de las precipitaciones (aunque en general hubo también muchas variaciones locales y de reversiones totales). El período más frío de la última era glacial se produjo en un intervalo situado entre –22.000 y –18.000 años.

A medida que el clima fue enfriándose, los seres humanos no tuvieron más remedio que abandonar las zonas en las que residían, pese a llevar cientos o miles de años instalados en ellas. Los asentamientos del norte de Europa, ocupados unos cuarenta mil años antes, quedaron abandonados durante varios milenios. Incluso en climas como los del extremo septentrional de Australia, donde las temperaturas eran notablemente más cálidas, las comunidades humanas tuvieron grandes dificultades para sobrevivir.[26] El río Lawn Hill, en la parte noroccidental de Queensland, excavó a su paso gruesas capas de piedra caliza y proporcionó a los pueblos de la región un adecuado sustento, tanto en peces como en animales acuáticos, gracias a la red fluvial y a las tierras altas de los alrededores. Sin embargo, en las fases más frías, la gente debía abandonar por completo los gélidos montes porque su única opción de supervivencia era permanecer en los resguardados entornos que les ofrecían los cañones y barrancos.

La colonización de la biosfera: los seres humanos se dispersan por el mundo

A medida que se fuera acumulando el conocimiento tecnológico y el saber ecológico, serían muchas las comunidades que decidieran trasladarse a un entorno nuevo, atraídas o empujadas por el cambio climático, por la existencia de conflictos con sus vecinos, o quizá incluso por la superpoblación. Durante miles de años, la larga sucesión de emigraciones a pequeña escala acabó llevando a nuestra especie, kilómetro a kilómetro, hasta el último de los continentes (exceptuando la Antártida). En la actualidad, mediante el estudio de los restos arqueológicos diseminados por todo el planeta y con el análisis comparativo de los genes de las diferentes poblaciones modernas podemos seguir la pista de estas migraciones.[27]

Hace cien mil años, durante el último período interglaciar, casi todos los seres humanos vivían en África, aunque una pequeñísima parte de ellos había partido ya para instalarse en Oriente Próximo. En algunos yacimientos arqueológicos, como los de las cuevas de Es Skhül y Jabel Qafzeh, en lo que hoy es Israel, hay indicios de que esas poblaciones pudieron encontrarse con los neandertales, e incluso aparearse con ellos de cuando en cuando. (Lo sabemos porque, en la actualidad, la mayor parte de los seres humanos que viven fuera de África poseen unos cuantos genes de neandertal.) Al parecer, en un período un poco posterior, cuando las temperaturas volvieron a descender, nuestros antepasados dejaron el Oriente Próximo en manos de los neandertales porque la corpulencia de estos se adaptaba mejor a los climas fríos. De hecho, no regresaron hasta hace unos sesenta mil años. No obstante, es posible que algunos grupos humanos viajaran al este y se adentraran en el Asia central y meridional. Una de las razones que nos inducen a pensarlo es que hace unos cincuenta mil o sesenta mil años los seres humanos llegaron hasta el Sahul (es decir, hasta el continente que durante la era glacial englobaba lo que hoy es Australia, Papúa Nueva Guinea y Tasmania). Los emigrantes que abandonaron África hace sesenta mil años debieron de desplazarse con una rapidez extraordinaria para poder llegar hasta allí, lo cual parece indicar que

los primeros australianos llegaron de comunidades que llevaban mucho tiempo establecidas en Asia.[28] El poblamiento de Australia fue un acontecimiento de primera magnitud en la historia de la humanidad. No sabemos qué hizo que los primeros ocupantes se presentaran en esa zona, aunque es probable que se tratara de circunstancias vinculadas con la presión poblacional o conflictos con otras comunidades afincadas en las regiones que hoy integran el sur de Indonesia. Sin embargo, tenemos la certeza de que para cruzar lo que actualmente llamamos el estrecho de Torres, desde Nueva Guinea, era preciso contar con técnicas marítimas avanzadas y disponer además de la capacidad de adaptarse con rapidez a un conjunto de plantas y animales completamente nuevo. Ninguna otra especie salvó ese brazo de mar. (Los dingos penetraron en Australia hace pocos miles de años, y casi con toda seguridad ayudados por el hombre.)

Es probable que las primeras emigraciones a Siberia y a las regiones septentrionales de Europa fueran efímeras tentativas de exploración alentadas por la irrupción de breves períodos cálidos en la secuencia glacial. No obstante, algunos emplazamientos como el de Mezhirichi muestran que hace veinte mil años nuestros antepasados ya eran capaces de hacer frente a entornos de frío extremo. Quizá algunos de ellos se asentaran de forma permanente en Siberia, hace nada menos que cuarenta mil años. Veinte mil años más tarde, en la fase de más intenso frío de la última Edad de Hielo, algunos grupos de siberianos partieron hacia el este y cruzaron a pie el puente continental de Beringia, practicable debido a que las tierras que hoy forman el fondo del mar de Bering habían emergido como consecuencia de la gran cantidad de agua retenida en los glaciares polares (circunstancia que hizo que el nivel del mar fuera en general mucho más bajo que en la actualidad). Una vez al otro lado del istmo de Beringia, los seres humanos se dispersaron por las dos Américas, bien atravesando Alaska, bien navegando en pequeñas embarcaciones a lo largo de la costa noroccidental de América del Norte. Desde allí, algunos de ellos emigraron a América

del Sur, y es probable que en unos dos o tres mil años alcanzaran incluso regiones tan meridionales como la Tierra del Fuego. En nuestros días, las primeras pruebas bien fundamentadas de la presencia humana en Norteamérica tienen una antigüedad aproximada de quince mil años.

Es probable que en el Paleolítico la emigración fuera la respuesta más común a las innovaciones o a la presión demográfica. Este incesante goteo de migraciones implica que, en el largo período que nuestra especie dedicó a diseminarse por el mundo, las comunidades humanas lograron conservar más o menos el mismo tamaño (lo que a su vez implica que a esas comunidades no les resultara difícil preservar buena parte de sus reglas sociales tradicionales). A esto se debe que el Paleolítico nos haya dejado pocas pruebas de la presencia de grandes asentamientos, aunque existen muchos datos que señalan que el número total de comunidades se incrementó, así como el número total de individuos de la especie. El antropólogo inglés Robin Dunbar ha argumentado que el grupo de mayor tamaño con el que consigue bregar el cerebro humano se reduce, por regla general, a 150 personas, lo que explicaría que las comunidades primitivas tendieran a escindirse de forma espontánea cuando superaban esa cifra. Dunbar sostiene que, incluso en nuestra época, la mayor parte de los seres humanos suelen integrarse en redes de carácter íntimo que no rebasan los 150 individuos, aun cuando puedan mantener relaciones más fugaces con otras muchísimas más personas. Las comunidades modernas son enormes, pero solo debido a que se han creado distintas estructuras sociales simultáneamente novedosas y especiales, ya que son estas las que les permiten conservar la cohesión.

Sea como fuere, las dimensiones de la mayoría de las comunidades del Paleolítico se conservaron en unos niveles de población lo bastante reducidos como para posibilitar que su organización se verificara sobre la base de las ideas de familia o parentesco, como sucede también con la mayoría de las sociedades

recolectoras modernas. Esto confirmaría la noción de que las comunidades paleolíticas responden más a la estructura de una familia que a la de una verdadera sociedad. Y si las comunidades recolectoras actuales pueden ilustrarnos, siquiera parcialmente, acerca del comportamiento de esos grupos primitivos, lo más probable es que interpretaran el término «familia» en un sentido amplio que incluía no solo a otras especies sino también a ciertos rasgos característicos del entorno, como las montañas y los ríos. La integración ecológica y cultural de las sociedades paleolíticas en sus respectivos medios naturales transitaba por unos derroteros conceptuales que a los urbanitas modernos les cuesta mucho entender.

La creciente complejidad del Paleolítico

Pese a su reducido tamaño, las comunidades del Paleolítico poseían a todas luces la universal facultad humana de acumular ideas, intuiciones y conocimientos nuevos, de manera que, aun siéndonos imposible seguir pormenorizadamente su particular peripecia, sabemos que mostraban un dinamismo cultural y tecnológico idéntico al que tuvieron las comunidades humanas de períodos posteriores, si bien a menor escala.

Al igual que los modernos recolectores, nuestros antepasados del Paleolítico debían de poseer sin duda un conocimiento íntimo y exacto de los hábitos y modo de vida de los animales e insectos que cazaban, y no hay duda tampoco de que conocían a la perfección las propiedades de las plantas que recogían para alimentarse, vestirse y equiparse. Las imprecisas redes que permitían el intercambio de individuos, narrativas, rituales e información debían de establecer vínculos entre las diferentes comunidades y permitirles mantener lazos en un amplio conjunto de zonas geográficas. Basándonos en las pruebas de naturaleza arqueológica y antropológica, podemos concluir que los grupos familiares vivían casi siempre separados pero

que se reunían periódicamente en una serie de acontecimientos paleolíticos equivalentes a nuestros modernos Juegos Olímpicos. Esto ocurría en emplazamientos propicios para el abastecimiento de víveres, en lugares en los que había comida suficiente como para celebrar reuniones temporales de varios cientos de individuos. En la región por la que hoy fluye el río que denominamos Snowy, en el sureste de Australia, se congregaban por ejemplo muchos grupos que hacían coincidir la fecha de la reunión con el momento en que las mariposas nocturnas conocidas en ese continente con el nombre de «polillas *bogong*» perforaban a millones sus capullos, proporcionando así alimento suficiente para satisfacer a los numerosos asistentes a esas reuniones masivas que actualmente identificamos con el término de *corroborees* y en las que no solo se intercambiaban historias, rituales y regalos, sino que también se confirmaba la vigencia de los lazos de solidaridad previamente establecidos, recurriendo para ello a distintos bailes y ceremonias. Por otra parte, las parejas unidas en lo que nosotros denominaríamos «matrimonio» (o los individuos descontentos) se trasladaban de un grupo a otro. Hace quince mil años, también en el sur de Francia hubo reuniones similares, ya que en esa zona las comunidades humanas se dedicaban a perseguir y cazar grandes manadas de caballos, ciervos y otras cabezas de ganado, tras lo cual se entregaban periódicamente a la realización de rituales y a plasmarlos después en bellas obras de arte rupestre. Las expresiones plásticas y las esculturas elaboradas en algunos yacimientos arqueológicos, como el de las cuevas de Lascaux y el abrigo rocoso de La Madeleine, en la región de la Dordoña, y las aún más antiguas tallas de piedra halladas en muchas partes de Australia, son, a ojos de los hombres actuales, tan hermosas y refinadas como cualquier otra obra artística que jamás haya salido de manos humanas. Y permiten además arrojar luz sobre el rico universo del intelecto y el imaginario de nuestros antepasados del período Paleolítico.

A medida que las técnicas de caza y recolección fueron ganando en delicadeza, nuestros predecesores empezaron a hallar formas nuevas de moldear su entorno. En algunas regiones del mundo transformaron la composición de la biosfera que les rodeaba. Los primeros seres humanos que desembarcaron en Australia encontraron un gran número de especies animales de grandes dimensiones (lo que habitualmente denominamos «megafauna»). Había rinocerontes, elefantes y jirafas tan enormes como los que actualmente pueden verse en el sur de África, la única región del planeta en la que todavía sobreviven importantes grupos de animales de esa talla. En Australia había canguros y wombats gigantescos, así como inmensas aves incapaces de volar, como el *Genyornis newtoni*. Sin embargo, de la forma más súbita imaginable, buena parte de esa megafauna australiana desapareció, y lo mismo acabaría sucediendo en Siberia y las dos Américas.

Es posible que desaparecieran debido a las modificaciones del clima. Aun así, habían sobrevivido a las eras glaciales anteriores, así que se hace difícil desdeñar la sospecha de que fueran los seres humanos, dotados de unos métodos de caza cada vez más complejos y sofisticados, quienes los empujaran al borde del abismo. Los registros cronológicos respaldan esta explicación. En Australia, Siberia y Norteamérica, la megafauna se desvaneció poco tiempo después de la irrupción de los seres humanos. Es posible que ese fatal desenlace se debiera, como en el caso del dodo de Mauricio, a que la megafauna extinta no considerara peligrosos a nuestros antepasados y tendiera a no emprender la huida al verlos, comportamiento muy distinto al de los grandes animales africanos que, al haber evolucionado de forma paralela a la especie humana, tenían clara conciencia del riesgo que suponían. En cualquier caso, lo cierto es que la megafauna, como todos los animales de dimensiones considerables (incluidos los dinosaurios), es particularmente vulnerable a la aparición de cualquier cambio repentino. Podrían mencionarse muchos ejemplos modernos de extinción de grandes animales: valga señalar en este sentido la

desaparición, pocos siglos después de la llegada de los seres humanos, de los gigantescos pájaros dinornítidos neozelandeses que comúnmente reciben el nombre de «moas». En Siberia y en las dos Américas se han encontrado incluso varios puntos de sacrificio, es decir, emplazamientos donde las expediciones concluían la caza dando muerte a las presas, lo que constituye una prueba directa de que los seres humanos eran predadores de grandes animales, como los mamuts.

La extinción de la megafauna transformó el medio. Los herbívoros de buen tamaño pueden ingerir un montón de plantas. Su supresión incrementó la frecuencia de los incendios, pues los restos de los vegetales secos quedaron esparcidos. Hace unos cuarenta mil años, muchas regiones de Australia asistieron a un notable aumento del número de incendios. En una importante proporción de los mismos, los rayos pudieron haber sido el elemento desencadenante. No obstante, sabemos con certeza que tanto en ese continente como que en otras muchas regiones del mundo paleolítico los seres humanos utilizaban sistemáticamente el fuego como fórmula para fertilizar la tierra. Los arqueólogos dan a esta tecnología el nombre de «agricultura del palo incendiario», pues asocian ese probable comportamiento primitivo con un hábito constatado ya en tiempos históricos de los indígenas australianos consistente en preparar la tierra que se disponían a cultivar blandiendo trozos de madera en llamas. El uso metódico del fuego, no solo para cocinar o protegerse de las amenazas, sino para transformar el entorno, constituye uno de los primeros signos del creciente poderío ecológico de nuestra especie. Si uno consigue dominar las destrezas necesarias para manejar el fuego de forma segura, la periódica quema de rastrojos ofrece un gran número de ventajas. Abrasar un terreno cubierto de hierba y maleza, y regresar uno o dos días después, nos permitirá disfrutar enseguida de una parrillada de plantas y animales. Si aguardamos unas cuantas semanas veremos que han aparecido nuevos brotes, debido a que el fuego ha esparcido la ceniza y esta ha actuado como fertilizante y

acelerado la descomposición de los restos vegetales y animales. Volverá a crecer la hierba, junto con otras plantas, y esto brindará a los agricultores la posibilidad de recogerlas antes que en un campo abandonado al curso natural de los acontecimientos. De hecho, por regla general, los retoños atraen tanto a herbívoros como a pequeños reptiles, lo que facilita y añade productividad a la caza. En resumen, la explotación del suelo basada en la quema de rastrojos aumenta el rendimiento de la tierra.

A finales del Paleolítico se usaron técnicas parecidas en muchas partes del mundo. Aunque, estrictamente hablando no pueda considerarse un verdadero método agrícola, lo cierto es que era una forma de aumentar la producción de plantas y animales útiles en una determinada porción de terreno. En otras palabras, el sistema constituía una especie de intensificación agraria. El cultivo basado en la quema de rastrojos anticipa ya, siquiera de modo incipiente, la posterior superabundancia de alimentos, recursos y energía que las actividades agrícolas y ganaderas pondrán sobre el tapete.

El primer período histórico de la humanidad

A medida que fueran compartiendo información, ideas y percepciones, así como con chistes, chismorreos y relatos (tanto en términos intergeneracionales como intercomunitarios), poco a poco los grupos humanos geográficamente próximos empezarían a acumular, región por región, un corpus de datos que casi me atrevería a denominar «científico». La ciencia del Paleolítico poseía conocimientos sobre los recursos utilizables, incluidos todos los derivados de la caza y la recolección, y hacían posible la alimentación, la confección de ropa o la curación de heridas y dolencias. Conocían detalles relacionados con las técnicas, ya se tratara de las vinculadas con la navegación, de las asociadas con la caza o de las precisas para buscar raíces y tubérculos; saberes astronómicos; y teorías sociales relativas a las formas correctas de

hablar con los mayores, de abordar a los extraños o de delimitar ritualmente las transiciones más relevantes de la vida de las personas. Todos estos conocimientos resultaban muy valiosos, pues eran necesarios para sobrevivir, lo que significa que atenerse a ellos y transmitirlos a otros eran asuntos muy serios. El conocimiento debía superar además el tamiz de un gran número de mentes, y esto a su vez permitía comprobar su solvencia, exactitud y utilidad, pues solo tras ese proceso podía tomarse la decisión última de incorporarlo a las historias de los orígenes que constituían el fundamento de la educación. Por consiguiente, esta lenta progresión (tanto de la cantidad de información disponible como de la calidad del control del mundo natural y los flujos de energía de la biosfera que esa acumulación de conocimientos proporcionaba a nuestra especie) acabó convirtiéndose en el primer motor de cambio de la historia de la humanidad. El conocimiento se difundió al ritmo de la creciente dispersión humana. Aunque el conocimiento continuara separado en compartimentos, parcelado en función de las diferentes comunidades, no es difícil imaginar el lento surgimiento, por primera vez en la historia del planeta, de una nueva esfera de conocimiento compartido: la noosfera, cuya existencia ya apuntaba antes.

En el transcurso del período Paleolítico, a medida que aumentó el número de seres humanos, la noosfera se extendió por África, Eurasia y Australasia, hasta llegar finalmente a las dos Américas. Al dispersarse por el continente africano, la población de las comunidades humanas debió de cifrarse en unas pocas decenas de miles de individuos, pero es posible que llegara a sumar unos cuantos cientos de miles, aunque seguramente con notables fluctuaciones numéricas. Como ya hemos visto, la cantidad de seres humanos cayó en picado, hasta reducirse a unas cuantas decenas de miles de personas, hace apenas setenta mil años. El demógrafo italiano Massimo Livi-Bacci estima que hace treinta mil años el volumen de población total quizá se situara en torno al medio millón

de individuos, a lo que añade que, a principios del Holoceno, es decir, hace exactamente diez mil años, podrían haber sido de entre cinco y seis millones.[29]

Si nos fijamos solo en estas dos últimas cifras, advertiremos que sugieren que las poblaciones humanas se multiplicaron aproximadamente por doce en los últimos veinte mil años del período Paleolítico (lo que arroja un crecimiento medio de un cuarto de millón de individuos por período de mil años). Si partimos del razonable supuesto de que cada persona utilizaba más o menos la misma cantidad de energía que antes, veremos que el consumo energético total de los seres humanos debía de ser también doce veces mayor. Esto significa que, durante más de cien mil años, el aprendizaje colectivo aumentó de modo significativo el control que los humanos eran capaces de ejercer en la energía y los flujos de recursos, y esto en muchas y muy distintas regiones del mundo.

La mayor parte de ese recrecido consumo de flujos de energía se empleó en abastecer al incremento de población. Las necesidades asociadas con el aumento local de la complejidad no requirieron un excesivo gasto de energía, dado que, según hemos señalado, las comunidades humanas conservaron unas dimensiones reducidas y unas relaciones basadas en la afinidad y la cercanía. Aun así, en el plano de la especie es indudable que la diseminación de los humanos por el mundo supuso un aumento de la complejidad, dado que hace diez mil años los seres humanos no solo empleaban ya un conjunto de tecnologías e informaciones muchísimo más diverso que el de cualquier otra especie de la Tierra, sino que la estaban desplegando además en buena parte del planeta.

No tenemos pruebas de que el incremento de energía aumentara el nivel de vida. Es posible que algunos recolectores llevaran una existencia perfectamente confortable. De hecho, el antropólogo Marshall Sahlins afirma que en ciertos entornos las comunidades del Paleolítico disfrutaban de una dieta variada, de una salud excelente y de mucho tiempo libre (tiempo que podrían dedicar a contar historias, a dormir, relajarse o a las maratonianas danzas que, según

parece, congregaban a la mayoría de las comunidades de pequeño tamaño).[30] Sin embargo, es muy poco probable que se dieran diferencias de riqueza importantes, puesto que los recolectores no tenían ningún motivo para acumular existencias cuando podían conseguir casi todo cuanto necesitaban del medio en que se desenvolvían. Además, cuando uno ha de echarse a menudo al camino, pone el máximo empeño en no llevar consigo más que los objetos de mayor valor, con la vista siempre puesta en que sean fáciles de transportar.

Al período más frío de la última era glacial, hace poco más de veinte mil años, le siguieron otros varios miles de años de ambientes templados pero inconstantes, hasta que hace unos doce mil años las temperaturas del globo empezaron a mantenerse en los niveles elevados y estables que han acompañado la historia de la humanidad en el transcurso del Holoceno. A finales de la última era glacial, los científicos extraterrestres de los que hablábamos antes ya habrían comenzado a observar con el máximo interés los extraños acontecimientos que estaban iniciándose en el planeta Tierra. Es más, a medida que el clima se fuera moderando, el comportamiento de los seres humanos iría revelándose aún más sorprendente. De forma extremadamente repentina (al menos en términos paleontológicos), nuestra especie accedió a unos flujos de energía de magnitud muy superior gracias a la agricultura y la ganadería, pues estos nuevos trasiegos energéticos empezaron a permitir de pronto que la complejidad, la diversidad, las dimensiones y el carácter intrincado de las sociedades humanas dieran una especie de salto cuántico.

Capítulo 8

AGRICULTURA Y GANADERÍA: UMBRAL 7

> «Cuando Adán labraba y Eva tejía, ¿quién ocupaba posición de caballero? Desde el principio, todos los hombres fueron creados iguales por la naturaleza, de modo que nuestro sometimiento o servidumbre proceden de la injusta opresión de los hombres malos. Si Dios hubiera querido que existiesen siervos desde el comienzo, habría señalado a quién correspondía la sujeción, y a quién la libertad.»
>
> John Ball, sermón pronunciado en Inglaterra durante la Revuelta de los Campesinos (1381)

Durante los primeros doscientos mil años de nuestra historia, y probablemente un poco más, nuestros antepasados eran recolectores. El constante goteo de innovaciones no solo les permitió ser más eficientes en esa recogida de frutos y bayas, sino que les abrió las puertas de una superior diversidad de entornos, con lo que al término de la última era glacial, hace unos diez mil años, podían verse seres humanos en casi todas las regiones del mundo. En estos últimos diez mil años, el surgimiento de una verdadera catarata de innovaciones, cuya esencia queda recogida en conceptos como «labranza» o «agricultura», transformó la forma de vida de los seres humanos.

La agricultura fue una megainnovación, comparable en cierto sentido a lo que fue la fotosíntesis o la aparición de los organismos pluricelulares. De hecho, al contribuir a que nuestros ancestros lograran explotar un mayor volumen de recursos y energías con las

que hacer más cosas y crear nuevas formas de riqueza, este invento puso a la historia de la humanidad sobre unos raíles nuevos y más dinámicos. Como suele suceder cuando se desata la fiebre del oro, ese filón de energía recién descubierto generó una larga serie de frenéticos cambios. En último término, esto provocó a su vez la transformación de la relación existente entre los seres humanos y la biosfera, pues, en su paulatino crecimiento las sociedades agrarias no solo empezaron a revelarse capaces de mantener a poblaciones mucho mayores, sino que elaboraron un número de componentes muy superior al de las sociedades recolectoras. El hecho de que las diferentes comunidades dispusieran de más energía, más recursos, más personas y más vínculos entre ellas generó ciclos de retroalimentación positiva que aceleraron los cambios. Debido a todo ello, la agricultura constituye el séptimo umbral de la creciente escala de complejidad de nuestra historia de los orígenes.

Los elementos potencialmente positivos que se asocian con el surgimiento de innovaciones de índole transformadora venían existiendo desde el momento mismo en el que se constató el arraigo del aprendizaje colectivo, pero ahora la materialización de ese potencial comenzaba a brotar de la conjunción de las tres condiciones Ricitos de Oro más importantes: la presencia de nuevas tecnologías (y el hecho de que el aprendizaje colectivo permitiera la progresiva comprensión del funcionamiento del medio), la creciente presión demográfica y la favorable influencia de los climas más templados de la época holocena.

¿QUÉ ES LA AGRICULTURA?

A medida que las comunidades humanas fueron perfeccionando la recolección y la gestión de la información relativa al medio que habitaban, consiguieron también una mejor comprensión, y por consiguiente una técnica más refinada, de los secretos de su actividad recolectora y cinegética, con lo que se incrementó

asimismo el impacto de su acción en las plantas, los animales y los paisajes. La agricultura basada en la quema de rastrojos, por ejemplo, modificó las condiciones reinantes en un vasto conjunto de territorios, pues aumentó la producción de plantas y animales útiles para los seres humanos. Cuando en 1770 el capitán James Cook y su tripulación recorrieron las costas orientales de Australia, lo que les llamó la atención no fue una dilatada extensión de tierras vírgenes, sino sobre todo las espirales de humo que se elevaban a lo lejos cuando los aborígenes australianos prendían fuego a la vegetación. De hecho, lo que contemplaron sus ojos fue un conjunto de paisajes tan alterados por la actividad humana como los huertos de la campiña inglesa en la que habían nacido. Hacía ya mucho tiempo que la megafauna australiana había desaparecido del mapa. La capacidad de medrar gracias a la acción del fuego que caracteriza a los eucaliptos que hoy dominan muchos de los paisajes australianos fue justamente la causa de que prosperaran en ese continente, pues se beneficiaron de la milenaria práctica de la agricultura del palo incendiario.

Tanto los granjeros como los recolectores aprovechaban la información acumulada a lo largo de muchos miles de años. Sin embargo, los primeros labriegos comenzaron a utilizarla de un modo realmente novedoso, consiguiendo con ello que la manipulación humana del medio ambiente se elevara a niveles nunca antes vistos.

El principio básico de la agricultura es la quintaesencia de la sencillez. Los agricultores emplean sus conocimientos del medio natural tanto para aumentar la producción de todas aquellas plantas y animales que juzgan más útiles como para reducir la proliferación de los que no les rinden ningún provecho. Los primeros labriegos empezaron por eliminar las malas hierbas y por regar la tierra para favorecer el crecimiento de las plantas que les interesaban, como el trigo y el arroz. Por su parte, los ganaderos en ciernes construían cercados para controlar a los animales que consideraban valiosos, como las ovejas y las cabras. Esta labor de arrancar la maleza inservible y de ahuyentar o matar a los animales que les

disgustaban, como las serpientes y las ratas, terminó por provocar una completa transformación de los paisajes, y además las plantas y los animales respondieron a la implantación de estos entornos nuevos, como hacen siempre ante cualquier cambio medioambiental: con una adaptación genética o, lo que es lo mismo, evolucionando. Esta es la razón de que comenzaran a aparecer nuevas variedades de plantas y de animales a medida que los granjeros fueran introduciendo alteraciones en su entorno. Las especies con mejores expectativas de prosperar resultaron ser las que los seres humanos encontraron gratas, que eran también las que recibían mayores cuidados de nuestros antepasados. Las plantas más nutritivas, como el trigo y el arroz aclimatados al medio humano, evolucionaron, y lo mismo sucedió con los animales domesticados más útiles, como los perros, los caballos, las vacas y las ovejas. Una vez amansados, los animales ayudaban a los cazadores, transportaban a la gente, acarreaban mercancías o proporcionaban lana o leche. Más tarde, al llegar la época de la matanza, procuraban a sus dueños carne, pieles, huesos y tendones.

Los granjeros y ganaderos comprendieron enseguida que la transformación del medio era un trabajo muy duro. No obstante, a cambio de sus arduas tareas, consistentes en talar, arar, desbrozar, drenar y vallar, obtenían mucha más energía y recursos de la tierra, los ríos y los bosques que les rodeaban, pues las especies que apreciaban florecían de un modo espectacular. Esto permitió a los primeros granjeros una mejor y mayor explotación de los omnipresentes flujos de energía fotosintética de la biosfera. Como es obvio, esto no implica necesariamente que aumentara el caudal de energía fotosintética global. Incluso es posible que disminuyera, porque los granjeros suprimían plantas de elevada productividad energética, como los árboles. Sin embargo, desde el punto de vista de los granjeros, el factor realmente importante era que ahora se hallaban en condiciones de extraer una mayor cantidad de recursos de los flujos existentes.

La actividad agrícola y ganadera proporcionaba a los campesinos algo más que alimentos, lana y fibras vegetales. Les confirió también la capacidad de acceder indirectamente a nuevos flujos de energía. Por ejemplo, los seres humanos no pueden comer hierba, pero los caballos y los bueyes sí, de modo que los ganaderos que dejaban pastar a sus monturas y animales de tiro, empleando después su energía para desplazarse o transportar objetos (o su carne como fuente de proteínas), estaban aprovechando los grandes flujos de energía fotosintética que acumulan las praderas. Esto supone una diferencia más que notable con todas las situaciones anteriores. Un ser humano puede producir, como mucho, unos 75 vatios de energía, pero un caballo o un buey pueden generar una cantidad diez veces mayor. Toda esa energía suplementaria podía utilizarse para abrir en la tierra surcos más profundos que los obtenidos con las azadas manuales, o para uncir un carro a los animales y transportar de ese modo enseres o personas. Los granjeros también se encontraron en situación de aumentar la producción de plantas y animales capaces de desempeñar más funciones que las meramente alimentarias, como sucede con el lino y el algodón, que pueden utilizarse para confeccionar telas. También estaba en sus manos la posibilidad de plantar árboles y utilizar la madera para construir viviendas, granjas, graneros, establos y cercas (sin olvidar la opción de quemarlos para cocinar los alimentos y calentar las casas).

En pocas palabras, la actividad agrícola y ganadera surgió como consecuencia de la existencia de una especie única y extremadamente hábil que aprendió a echar mano de una creciente cantidad de información sobre las diferentes posibilidades de explotar el medio. Gracias a la magia del aprendizaje colectivo, los seres humanos descubrieron fórmulas para aumentar el porcentaje de energía y recursos que extraían de los flujos presentes en la biosfera, procediendo para ello a desviar volúmenes crecientes de esas corrientes energéticas para cubrir así sus necesidades, lo que significa que, en este sentido, nuestros antepasados actuaron tal

como harían más tarde al canalizar los grandes ríos y lograr que irrigaran sus campos de cultivo y abastecieran de agua potable a sus ciudades.

Desde la perspectiva de un biólogo, la actividad agrícola y ganadera es una suerte de simbiosis, pues consiste en el establecimiento de una estrecha relación entre dos o más especies diferentes que se benefician mutuamente. Si los cazadores y recolectores utilizaban y conocían varios centenares de especies distintas de plantas, animales e insectos, los granjeros optaron por centrarse en cambio en un pequeño número de organismos, pero el hecho de que ambas partes implicadas salieran favorecidas hizo surgir unas relaciones de excepcional familiaridad entre ellos. Es frecuente que el establecimiento de unos vínculos simbióticos muy profundos termine provocando cambios en el comportamiento y la estructura genética de las especies implicadas. Las hormigas melíferas modernas «domestican» a los pulgones. Los protegen, les proporcionan alimento y les ayudan a reproducirse. En la actualidad, los pulgones se han transformado hasta tal punto que ya no son capaces de sobrevivir por sí solos. Retribuyen a las hormigas por el alimento y la protección que reciben mediante una secreción dulce, similar a la miel, cuando sus cuidadoras las estimulan con unos suaves golpecitos en el abdomen. Otra relación que a nuestros ojos resulta más familiar e importante es la que media entre las plantas y las abejas. Las abejas liban el néctar de las flores y de ese modo estas últimas consiguen una mayor fiabilidad en la reproducción, dado que los insectos transportan su polen de una flor a otra. Si matamos demasiadas abejas, la cosecha de grano con la que hoy se alimentan miles de millones de seres humanos se verá seriamente comprometida.

Lo cierto es que la calidad de vida de las especies predilectas de los campesinos, a las que prodigaban grandes cuidados y por las que trabajaban con notable ahínco (es decir, las domesticadas), mejoró muy poco. Sin embargo, en términos demográficos prosperaron a la perfección. Su número se disparó, mientras que la

población de animales salvajes (esto es, los que no interesaban a los granjeros) cayó en picado. En el año 2000, la biomasa total formada por el conjunto de los mamíferos salvajes de hábitat terrestre representaba poco más de un 4 % de la población global de animales domésticos.[1]

La simbiosis provoca una auténtica metamorfosis en todas las especies implicadas, dado que evolucionan juntas. Para comprobarlo basta comparar una mazorca de maíz moderna con el teosinte, su deslucida predecesora silvestre; o bien las diferencias existentes entre un muflón salvaje y su actual pariente doméstico. Tendremos la impresión de que la tendencia del desarrollo evolutivo del animal domesticado ha consistido en agradar a los seres humanos. Se ha vuelto dócil (alguien podría decir, con cierta acritud, que es también mucho menos espabilado que sus primos campestres), produce más lana de la que necesita, su carne nos resulta sabrosa y podría sobrevivir sin la protección de los seres humanos. Aun así, en términos demográficos la asociación con nuestra especie constituye una estrategia evolutiva de un éxito asombroso. Hoy hay más de mil millones de ovejas domésticas, pero las poblaciones de muflones son sumamente exiguas.

Los seres humanos también experimentaron cambios, pero la mayor parte de los ajustes que tuvieron que hacer fueron más de carácter cultural que genético. Las modificaciones genéticas de nuestra especie se han producido como consecuencia de la actividad agrícola y ganadera. Por ejemplo, si usted desciende de algún grupo de antiguos pastores de ganado, habituados a consumir leche de vaca o de yegua, es más probable que pueda digerir los productos lácteos incluso en la edad adulta, dado que su organismo continúa fabricando lactasa, es decir, la enzima capaz de digerir la lactosa (el azúcar de la leche). Los cazadores y recolectores solo consumían la leche materna, y únicamente hasta los cuatro años de edad, poco más o menos, pero una vez superada la infancia ya no necesitaban segregar lactasa. Sin embargo, si por alguna circunstancia la leche de vaca o de yegua se convertía en la principal fuente de alimento

de una comunidad, sus miembros empezaban a producir lactasa incluso después de la pubertad (lo que indica que habían sufrido una mutación genética).

En la mayoría de los casos, la adaptación de los seres humanos a las relaciones simbióticas impuestas por la agricultura y la ganadería no se llevó a cabo mediante modificaciones genéticas, sino por la adquisición de nuevas conductas, es decir, a través de la larga serie de innovaciones tecnológicas, sociales y culturales que fueron acumulando gracias al aprendizaje colectivo. Desarrollaron nuevas formas de trabajar la tierra y de explotar los bosques y los ríos. Y a medida que lo hacían tuvieron que aprender nuevos modos de colaboración y convivencia. El cambio cultural se verificó a una velocidad muy superior a la de la mutación genética, lo que explica que la actividad agrícola y ganadera transformara la vida humana en el espacio de unas pocas generaciones.

Desarrollo histórico y geográfico de las primeras labores campesinas

Nuestros antepasados necesitaron de cien mil a doscientos mil años para adaptar sus tecnologías de cazadores y recolectores a los numerosos y muy diferentes entornos de la Tierra. La explotación del campo y el ganado se extendió por la superficie del globo en menos de diez mil años, pues ese fue el lapso de tiempo que precisaron los granjeros para adaptar sus métodos de cultivo de plantas y de cría de animales a la variedad de especies, suelos y climas del planeta. Hoy podemos seguir el rastro de la expansión de la actividad agropecuaria con los mismos sistemas que empleamos para estudiar la propagación de una enfermedad a partir de un conjunto de puntos de contagio.

La actividad agrícola y ganadera no se expandió de manera uniforme y sosegada. Si en algunas regiones su difusión se verificó con rapidez, en otras se asentó más lentamente, e incluso hubo zonas en las que apenas alcanzó a penetrar. No obstante, lo que

ahora nos importa es que esas diferencias estaban llamadas a ejercer un enorme impacto en la geografía de la historia humana. En el momento en el que la explotación agropecuaria inició su andadura, los seres humanos se hallaban ya dispersos por tantos y tan distantes ecosistemas que los acontecimientos ocurridos en una parte del mundo apenas tenían efectos en otra zona. Los principales cambios se verificaron con cuentagotas, comunidad por comunidad, y su primera vía de difusión fueron las redes locales. Con el paso del tiempo, los conceptos se revelarían capaces de salvar distancias crecientes, pero hasta hace solo quinientos años existía un puñado de barreras que impedía el desplazamiento de personas, ideas y tecnologías, incluidas las relacionadas con las prácticas agropecuarias. La subida del nivel de los océanos, sobrevenida tras la última era glacial, es decir, hace diez mil años, quebró los puentes que unían Eurasia con las dos Américas. Y tampoco quedó prácticamente ningún punto de conexión entre Eurasia y Australasia o las islas del Pacífico occidental, en algunas de las cuales por entonces los seres humanos llevaban instalados nada menos que veinte mil años (dado que la presencia humana en los archipiélagos australes se cifra hoy en treinta mil años). Esto significa que en esa época nuestros antepasados vivieron dispersos por un cierto número de islas o zonas del mundo, sin posibilidad de comunicación entre sí. En el interior de esas regiones, el desarrollo de la historia humana se llevó a cabo poco menos que en entornos tan dispares como los de dos planetas distintos.

La zona del mundo más extensa y antigua era la de Afro-Eurasia. En ella, justamente, habían evolucionado los seres humanos, y de hecho, el puente terrestre que enlazaba el continente africano con el euroasiático, permitía que las ideas, las personas y los bienes circularan de un lado a otro, en oleadas sucesivas, salvando de ese modo distancias enormes. La siguiente región planetaria en orden de antigüedad era la de Australia, que había asistido a los primeros asentamientos humanos hace unos sesenta mil años. Durante la última era glacial, el área geográfica de Australasia había estado

enlazada con Papúa Nueva Guinea y Tasmania, pero sus conexiones con Eurasia eran muchísimo menos firmes. Hacía ya un mínimo de quince mil años que la tercera región mundial en extensión, la formada por las dos Américas, había acogido los primeros poblamientos de *Homo sapiens*, pero se vio aislada casi por completo de Eurasia cuando al final de la última Edad de Hielo el estrecho de Bering quedó cubierto por las aguas,. En los más recientes milenios acabaría por surgir una cuarta región en el Pacífico. La ocupación primitiva de las islas más occidentales del mundo, como las Salomón, podría haberse producido hace nada menos que cuarenta mil años, pero en las islas situadas en los extremos oriental y meridional del planeta (incluidas Nueva Zelanda, Hawái y la isla de Pascua) los asentamientos se verificaron como consecuencia de una notable serie de migraciones marítimas iniciadas hace solo tres mil quinientos años.

La existencia de todas estas regiones mundiales bien diferenciadas puso en marcha un fascinante experimento natural, dado que hoy, al volver la vista atrás, podemos contemplar los distintos derroteros que siguió el desarrollo de la historia humana en esos escenarios tan diversos.[2] El relato histórico de estas regiones del planeta presenta similitudes relevantes. En todas ellas, el aprendizaje colectivo dio lugar a la aparición de una larga serie de tecnologías, relaciones sociales y tradiciones culturales nuevas. Sin embargo, esos procesos se produjeron a velocidades diferentes, lo que significa que la actividad agrícola y ganadera evolucionó de forma dispar, dando así surgimiento a un conjunto de historias regionales realmente heterogéneo. Después del año 1500, cuando esas regiones se reconectaron, se descubrió enseguida la enorme importancia de las desigualdades fraguadas en el transcurso de los siglos.

Las primeras manifestaciones de la cultura agropecuaria surgieron en la región de Afro-Eurasia, y desde esa base no solo lograron expandirse al máximo sino ejercer también el mayor de los impactos. Se materializó asimismo muy pronto en Papúa Nueva

Guinea. Y finalmente conseguiría prosperar del mismo modo en las dos Américas. En otras zonas del mundo, y pese a que fueron muchas las comunidades que exploraron diversas modalidades de cultivo y cría de ganado, su repercusión no generaría tantas transformaciones.

Hace aproximadamente catorce mil años, los grupos de cazadores y recolectores se habían dispersado ya por todas las regiones del planeta, y algunos de ellos empezaron a asentarse y a reorganizar el medio en el que se desenvolvían, sobre todo en los territorios de Afro-Euroasia. Cinco mil años más tarde comienzan a verse aldeas de campesinos en distintos lugares: en el punto de unión entre los continentes africano y euroasiático, a lo largo del río Nilo, y en el arco montañoso que bordea las costas orientales del Mediterráneo (al que solemos llamar Creciente Fértil). Dos mil años después se advertirá la presencia de localidades de labriegos y pastores en una región muy diferente, los montes de Papúa Nueva Guinea. Es probable que hace unos cuatro mil años hubiera ya comunidades de granjeros en muchas zonas de África y de Europa, así como en buena parte del sur, el sureste y el este de Asia, o en la región panamericana. Es muy posible que por esta época la mayoría de los seres humanos dependiera ya de las prácticas agrícolas y ganaderas, puesto que esa forma de aprovechamiento del medio se revelaba capaz de soportar una mayor presión demográfica que la de los cazadores y recolectores. No obstante, todavía había vastas regiones del mundo, de entre las que destacan Australia, el Pacífico y muchas áreas de las dos Américas y de Afro-Eurasia, habitadas solo por comunidades sumamente dispersas de cazadores y recolectores nómadas, aunque incluso en esos casos es posible detectar en ocasiones pequeños movimientos de transición hacia la explotación del campo y el ganado.

La actividad agropecuaria, o sus versiones incipientes, evolucionó por vías en buena medida independientes en las diferentes regiones planetarias. No se trató de un invento único que se desarrollara de golpe y ya plenamente constituido. Esto sugiere algo muy

importante: que a medida que las comunidades humanas aisladas y autosuficientes fueron acumulando cantidades crecientes de conocimientos tecnológicos y ecológicos aumentaron también las probabilidades de que acabaran poniendo en práctica, fueran a donde fuesen, el saber previamente atesorado en su etapa de cazadores y recolectores, partiendo después de esa base para desarrollar las técnicas agropecuarias. Sin embargo, solo existirían probabilidades de que procediesen de ese modo si necesitaran los recursos extra que la actividad agrícola y ganadera podía proporcionarles, pues, a fin de cuentas, la adopción de una cultura campesina no solo conlleva tareas verdaderamente arduas, sino que obliga a transformar de arriba abajo el modo de vida de una comunidad.

¿Qué pudo impulsar a los seres humanos a cultivar la tierra y a cuidar ganado? La superación del umbral 7

Al final de la última era glacial, la confluencia de dos cambios de ámbito planetario determinó el surgimiento de un pequeño número de regiones en las que la vida campesina empezó a resultar tentadora. En primer lugar, el clima fue haciéndose paulatinamente más cálido y húmedo en todo el mundo; y en segundo lugar, los cazadores y recolectores ocupaban tanta superficie que algunas regiones comenzaron a sufrir problemas de superpoblación. Estos dos cambios indujeron a los seres humanos a adoptar una existencia agrícola y ganadera. Dado que, al menos hasta cierto punto, esos cambios se dejaron sentir en muy diferentes regiones de la geografía de la época, podemos encontrar en ellos la explicación al extraño hecho de que la agricultura y la ganadería aparecieran, con diferencias de unos cuantos miles de años, en todas las zonas del mundo que hemos señalado, pese a que no tuvieran ninguna posibilidad de contacto mutuo.

El clima empezó a moderarse, aunque de manera bastante irregular, hace unos veinte mil años, de modo que hace aproximadamente trece mil, la temperatura media del globo pasó a situarse en niveles similares a los actuales. Sin embargo, durante la ola de frío conocida como período Dryas Reciente, las temperaturas cayeron en picado durante unos dos mil años como mínimo, tras lo cual volvieron a ascender. El clima llevaba cerca de diez mil años manteniéndose en cotas insólitamente estables. Añadido a esta excepcional estabilidad climática, el hecho de que las temperaturas fuesen más templadas y húmedas permitió que la agricultura y la ganadería resultaran más viables que en el transcurso de los cien mil años anteriores, lo que a su vez generó las condiciones Ricitos de Oro precisas para el desarrollo de toda la era agraria. Las gráficas que recogen la media de las temperaturas registradas a lo largo de los últimos sesenta mil años muestran con claridad el notable equilibrio climático experimentado en los últimos diez mil años, aunque a medida que las mediciones se alejan de los trópicos las variaciones se acentúen.

Unos climas más cálidos y húmedos a comienzos del Holoceno propiciaron la aparición de un reducido número de regiones caracterizadas por la abundancia y la diversidad de la vida vegetal, lo que dio pie a una serie de fértiles «jardines del Edén», ideales para los cazadores y recolectores locales. En algunas de esas regiones, los recursos eran tan abundantes que estos nómadas pudieron asentarse en comunidades o poblaciones de carácter permanente. Recientemente se han encontrado en el archipiélago Dampier, frente a las costas de la Australia Occidental, unas casas de piedra de planta circular de nueve mil años de antigüedad.[3] También se ha estudiado, y con mayor detalle, la incidencia de otros cambios similares en el Creciente Fértil, en la costa oriental del Mediterráneo. Hace catorce mil años se instalaron en esta región, formando aldeas permanentes integradas por varios cientos de personas, una serie de comunidades que los arqueólogos denominan «natufienses». Estos grupos cosechaban cereales silvestres valiéndose de hoces

fabricadas con piedras de sílex afiladas e incrustadas en una quijada de asno. También guardaban gacelas en rediles, construían casas y enterraban a sus muertos en cementerios. No puede afirmarse que practicaran la agricultura y la ganadería, ya que el polen que se ha encontrado en estos yacimientos arqueológicos pertenece a gramíneas silvestres, pero eran sin duda poblaciones sedentarias y vivían en aldeas. Los arqueólogos se refieren a estas comunidades como «cazadores y recolectores acomodados».

Es posible que la presión demográfica animara a los natufienses a adoptar un modo de vida más sedentario. Estos colectivos humanos nos han dejado un gran número de asentamientos, lo que sugiere que en el Creciente Fértil las poblaciones crecían con notable rapidez. No es sorprendente, pues esta región de la cuenca oriental mediterránea se encuentra en una encrucijada en la que confluyen las principales rutas migratorias entre África y Eurasia, rutas que podrían haber contribuido a encauzar la llegada de nuevos viajeros.

Por diversas vías, el sedentarismo estimuló aún más el crecimiento demográfico. Los cazadores y recolectores intentaban a menudo limitar el crecimiento de la población, pues eran muy conscientes del escaso número de personas que podía sostener el medio natural. Sin embargo, en las aldeas ya no era necesario cargar con los bebés ni con los niños pequeños, y además se les podía poner a trabajar en cuanto crecían un poco. Eso transformó la actitud que hasta entonces se había tenido en relación con las familias, los niños y los roles de género. En las reducidas poblaciones de la época, la posibilidad de engendrar una gran cantidad de hijos no solo proporcionaba abundante mano de obra para la realización de las tareas domésticas, también permitía proteger y cuidar a los ancianos. Esta es la razón de que en la mayoría de las comunidades sedentarias surgiera la expectativa de que las mujeres parieran el máximo número de hijos posible, aunque esta esperanza también se fundaba, al menos en parte, en el hecho de que las personas de la época sabían que era muy posible que la mitad de la descendencia falleciese antes de alcanzar la edad adulta.

Este tipo de planteamientos agudizó las diferencias entre los roles de género y determinó que, a lo largo de toda la fase agraria de la historia de la humanidad, las mujeres se vieran obligadas a dedicar la mayor parte de su existencia al alumbramiento y la crianza de los hijos. Estas mismas reglas explican que, en el plazo de unas cuantas generaciones, abundaran las aldeas de cazadores y recolectores acomodados que debían hacer frente al desafío de la superpoblación.[4]

El incremento de la población hizo que los natufienses tuvieran que extraer más recursos de la tierra. Esto implicaba una preparación más esmerada de los campos de cultivo, y al final determinó la adopción de un tipo de vida basado en una auténtica práctica de la agricultura y la ganadería, al menos en alguna de sus variantes. Con ello, los natufienses estaban cediendo a un seductor canto de sirenas. Habían levantado sus primeras poblaciones en un entorno que parecía un verdadero paraíso ecológico, pero en el plazo de unas cuantas generaciones se vieron frente a una nueva crisis demográfica, y dado que las comunidades vecinas también estaban creciendo a un ritmo frenético, les resultó imposible ocupar nuevos terrenos. La única alternativa era utilizar todos los trucos que pudieran guardar en la recámara para aumentar la productividad de los campos que ya poseían. Estas presiones les empujaron, probablemente a regañadientes, a aceptar la dura vida del granjero, sin saber en cambio que, a medida que fueran cobrando conciencia de lo que significaba dedicarse a la labranza y a la cría de animales, irían olvidando las ventajas e inconvenientes de su antigua vida de cazadores y recolectores. Como suele suceder con el aprendizaje colectivo, la acumulación de un nuevo conocimiento terminaría por eclipsar los pasados conocimientos y percepciones. De este modo, el impacto de todo un conjunto de presiones similares, asociadas siempre al paulatino crecimiento de la población, iría provocando en muchas y muy diferentes regiones del mundo la transformación de las comunidades de nómadas y seminómadas originalmente dedicados a la caza y la recolección en campesinos sedentarizados.[5]

Una de las mejores pruebas de la transición por la que se pasa del modo de vida propio de los cazadores y recolectores acomodados a la actividad agrícola y ganadera procede de Tell Abu Hureyra, en la parte septentrional de la actual Siria, cerca del valle del Éufrates. Este yacimiento arqueológico se descubrió a principios de la década de 1970 y solo se pudo excavar en él durante dos temporadas, pues luego quedó sumergido como consecuencia de la construcción de una presa. Los primeros niveles, que consistían en un grupo de casas de planta redonda características de la arquitectura de los cazadores y recolectores natufienses, tenían una antigüedad próxima a los trece mil años. Sus habitantes cazaban gacelas y onagros y solían acumular una amplia variedad de alimentos, de entre los que destacan las nueces, las frutas de distintas clases, y los cereales silvestres. A medida que el descenso de las temperaturas se fue acentuando, en el transcurso de los dos mil años que duró la repentina ola de frío del Dryas Reciente, las frutas de clima cálido desaparecieron y los habitantes de las aldeas empezaron a basar su alimentación en gramíneas más resistentes, aunque resultara más difícil almacenarlas y procesarlas. Al final no les quedó más remedio que apostarlo todo a las variedades domésticas del centeno, que se adaptaban bien al frío, así que todo indica que el factor que convirtió en campesinos a los cazadores-recolectores fue un brusco cambio climático, al menos en el caso de Tell Abu Hureyra. Cuando se aproximaba ya el final del período gélido, los pobladores de este asentamiento lo abandonaron durante muchos siglos, pero el lugar volvió a ser ocupado hace cerca de once mil años. En esta ocasión surgió un pueblo de cierta importancia, con cientos de casas rectangulares hechas de ladrillos de adobe y varios miles de habitantes dedicados al cultivo de especies vegetales productivas y a la caza de gacelas y muflones. A partir de ese momento, los arqueólogos advierten un aumento muy rápido del número de restos óseos ovinos, señal indudable de que las ovejas habían pasado a ser una especie domesticada por completo. Los fragmentos de esqueletos humanos revelan lo dura

que podía llegar a ser la vida de los primeros campesinos y criadores de ganado. Todas las denticiones encontradas muestran signos de un intenso desgaste debido a una dieta compuesta sobre todo de cereales, aunque la erosión dental disminuye al aparecer la cerámica, ya que esta permitía cocinar el grano y elaborar papillas. Los huesos femeninos muestran claras pruebas de consunción en las rodillas, ya que las mujeres pasaban muchas horas balanceándose sobre ellas al moler el grano.[6]

Apenas hay duda de que los primeros campesinos aceptaron la actividad agrícola y ganadera muy a su pesar, dado que, según parece, el nivel de vida de las primeras aldeas agrícolas resultó ser inferior al de los antiguos cazadores y recolectores. Los esqueletos hallados en las primitivas poblaciones de granjeros del Creciente Fértil muestran por regla general que se trataba de individuos más bajos que sus vecinos recolectores, lo que sugiere que su dieta debía contener una menor variedad de alimentos. Aunque los granjeros podían producir una mayor cantidad de comida, también se hallaban más expuestos a las hambrunas, pues a diferencia de los cazadores y recolectores, dependían de un pequeño número de cultivos básicos, y si les fallaba la cosecha tenían graves problemas. En los restos óseos de los primeros agricultores y ganaderos se han encontrado pruebas de diferentes deficiencias vitamínicas, probablemente debido a la habitual incidencia de períodos de hambruna entre cosecha y cosecha. También aparecen signos de estrés, que se cree vinculado al trabajo intensivo que exigen las labores del campo: arar, cosechar, talar, mantener edificios y cercas, moler el grano... Además, las aldeas producían desperdicios, y estas atraían toda clase de plagas, lo cual, añadido al considerable número de pobladores, contribuyó a extender una serie de enfermedades que jamás habrían logrado propagarse entre las comunidades de cazadores-recolectores, dado que estas no solo tendían más al nomadismo sino que contaban con un menor número de miembros. Todos estos datos apuntan a un evidente deterioro de la salud, y sugieren que lo que indujo a los primeros agricultores y ganaderos a

adaptarse al complejo y crecientemente interconectado tipo de vida campesino fue más la necesidad que el señuelo de sus eventuales ventajas.

¿Cómo aprendieron a aumentar la productividad de la tierra sin incrementar la superficie cultivada? Y de hecho, ¿cómo se iniciaron en los secretos de la agricultura y la ganadería? Aquí es donde interviene con mayor fuerza y claridad el aprendizaje colectivo. Casi cualquier otra especie enfrentada a una secuencia de crisis ecológicas similares habría acabado por estrellarse contra un muro demográfico. La existencia de esa pared es lo que explica que, en la mayoría de los casos, el crecimiento de la población de los organismos, sean del tipo que sean, presente una característica forma de «S», puesto que toda nueva especie se multiplica mientras no agote la energía alimentaria de su nicho ecológico, pero una vez superado ese punto los individuos mueren de hambre, la fertilidad desciende y el crecimiento de la población se estanca. Si los seres humanos tuvieron más opciones fue porque disponían de mayor información. Hasta entonces nadie había necesitado echar mano de esa información, o al menos no en la medida en que ese momento requería. Había existido en forma de conocimiento potencial, un poco al modo de la energía potencial (lo que significa que era un saber mantenido en reserva en espera de que las circunstancias exigieran su activación). Los cazadores y recolectores modernos poseen una gran cantidad de conocimiento potencial, y pueden recurrir a él en caso de que surja una crisis. En este sentido, resulta indudable que los natufienses contaban con formas de conocimiento muy parecidas. Sabían que las plantas que les gustaban crecían mejor si se las regaba y si se eliminaban los brotes rivales mediante el desbrozado de los campos. En Australia, en los últimos siglos, las comunidades recolectoras han ido introduciendo toda una serie de tecnologías intensivas, como la del cosechado de gramíneas (utilizando hoces fabricadas con cuchillas de sílex y mangos forrados de piel, en la parte septentrional del continente), la molienda de semillas, o la cría de anguilas en unos sistemas de pequeñas

canalizaciones construidas a tal efecto.[7] Sin embargo, en la mayoría de los casos, los cazadores-recolectores se desentienden de esta clase de tecnologías, porque no las necesitan y además requieren mucho trabajo extra. En ciertas regiones, como por ejemplo la del Creciente Fértil, los cambios climáticos y demográficos de principios del Holoceno proporcionaron a un tiempo la oportunidad y la motivación necesarias para que las comunidades humanas recurrieran a estas tecnologías de reserva y pasaran a utilizarlas de una forma más o menos continuada. Esto es lo que convirtió a los cazadores-recolectores en granjeros.

En resumen, un clima más cálido hizo posible la vida aldeana y la actividad agrícola y ganadera en unas cuantas regiones dotadas de las condiciones precisas; en algunas ocasiones, la presión demográfica convirtió en necesaria esa posibilidad; y por último, el conocimiento que los cazadores y recolectores habían venido acumulando y manteniendo en la reserva durante varios de milenios puso en manos de nuestros antepasados las tecnologías precisas para que los primeros granjeros iniciaran su andadura.

El carácter aleatorio de los movimientos de las placas tectónicas y el tipo de plantas y animales que se hubieran desarrollado en una región dada fueron los dos principales factores que determinaron, en sus comienzos, la distribución geográfica de la actividad agrícola y ganadera. Había plantas y animales que podían domesticarse con facilidad y otras que no aceptaban la tutela humana. Los cazadores y recolectores se sintieron atraídos por ciertas regiones, como el Creciente Fértil, debido a que se trataba de territorios cuya población de plantas y animales era susceptible de domesticación.[8] No hay duda de que los cazadores y recolectores probaron con muchas especies distintas antes de saber si podían o no adaptarse a la simbiosis con el ser humano. Entre las plantas más atractivas se encontraban las que almacenaban grandes cantidades de nutrientes para sus semillas, como es el caso de los árboles frutales. Y todavía mejores eran las plantas estacionales provistas de tubérculos o semillas grasas repletas de nutritivas golosinas capaces de contribuir

a la supervivencia de los grupos que las consumían en períodos de sequía. Si se cosechaban en el momento de su plena maduración, el trigo y el arroz proporcionaban tal concentración de elementos nutritivos que merecía la pena realizar el enorme esfuerzo que requería su siembra, protección, riego, cosecha y almacenamiento.[9]

La utilidad de los animales también difería de una especie a otra. Las cebras demostraron ser demasiado irascibles para aceptar la domesticidad. Los leones y los tigres no solo eran demasiado peligrosos sino que tampoco tenían una carne particularmente sabrosa. Sin embargo, los animales gregarios, como las cabras, las vacas y los caballos, podían controlarse con mayor facilidad, sobre todo si los seres humanos lograban colocarse en el papel de líderes de la manada. En el caso de los animales herbívoros, su metabolismo podía transformar la hierba en carne, leche, cuero, tendones y energía, lo que permitió a los seres humanos explotar las inmensas praderas de los cuatro puntos cardinales. Además, por regla general la carne de estos ejemplares era rica y nutritiva. No obstante, cuando la agricultura inició su expansión solo se encontraban grandes herbívoros domesticables en Afro-Eurasia. Y como ya hemos visto, la mayor parte de la megafauna de Australasia y las dos Américas (con la excepción parcial de los camélidos sudamericanos, como las llamas) se había extinguido, probablemente poco después de la irrupción de los seres humanos. Esto podría contribuir a explicar que la agricultura prosperara antes y se expandiera más en la zona de Afro-Eurasia que en otras regiones del mundo.

La primera era agraria: la actividad agrícola y ganadera se propaga por la superficie del planeta

Después de aparecer en varias zonas centrales, las aldeas de campesinos se multiplicaron y empezaron a aparecer en todas partes, impulsadas por el conocimiento de los granjeros, que

perfeccionaban sus destrezas, aprendían nuevas formas de incrementar la producción e introducían las labores del campo en nuevos territorios.

Los grandes ríos que durante miles de años habían estado depositando fértiles limos aluviales, como el Tigris y el Éufrates en Mesopotamia, el Amarillo (Huang He) y el Yangtsé en China, y el Indo y el Ganges en el subcontinente indio, comenzaron a atraer a un creciente número de granjeros. Es posible que en el Creciente Fértil y en la cuenca del Nilo empezaran a aparecer aldeas campesinas hace once mil años, y es también probable que de mil a dos mil años más tarde sucediera otro tanto a orillas de los ríos Yangtsé y Amarillo. En las montañas de Papúa Nueva Guinea, hace seis o siete mil años se cultivaban ya algunas plantas comestibles, como el taro.* Hace cinco mil o cuatro mil años existían pueblos de agricultores y ganaderos en el valle del Indo y en el África occidental. También se observa por esa época la presencia de campesinos en las regiones americanas: a lo largo del río Misisipí, en ciertas zonas de lo que hoy es México, en Centroamérica, y en los Andes, cuyas montañas permitían explotar diferentes entornos así como una amplia gama de plantas y animales potencialmente susceptibles de ser domesticados.

La difusión de la actividad agrícola y ganadera no fue en modo alguno automática, así que sería un error suponer que se limitara a progresar a partir de las regiones centrales en las que había surgido. Valga como ejemplo el hecho de que no pasara de las zonas montañosas de Papúa Nueva Guinea al litoral de esa misma región, debido a que los cultivos de altura, como el taro y el ñame, no prosperaban adecuadamente al nivel del mar.

A medida que la presión demográfica comenzó a alentar a los grupos migratorios a penetrar en nuevos entornos, los seres humanos no solo se vieron obligados a adaptar sus técnicas de cultivo y cría de ganado, sino que en ocasiones tuvieron que esperar a que las especies que habían domesticado evolucionaran y dieran lugar a nuevas variedades. En un proceso iniciado hace ocho mil

años y que duraría cuatro mil, la actividad agrícola y ganadera se extendió, partiendo del Creciente Fértil, por el Asia central, llegó a Turquía y penetró más tarde en los Balcanes, hasta afianzarse en el este y el oeste de Europa. Durante esta propagación campesina por las regiones de Europa (no solo más frías y boscosas, sino con suelos diferentes, distintas estaciones de cultivo y otro tipo de plagas), tanto los granjeros como sus cultivos tuvieron que adaptarse. En la Europa central y septentrional, los granjeros desarrollaron nuevas variedades de grano. En las regiones forestales se dedicaron a la agricultura itinerante, o a aplicar el sistema de tala y quema, procediendo a una suerte de laboreo nómada. Los granjeros suecos prendían fuego a los árboles y los talaban; una vez hecho esto, cultivaban el suelo cubierto de ceniza que quedaba despejado entre los tocones; y al cabo de unos cuantos años, cuando la tierra perdía su fertilidad inicial, se trasladaban a otro punto. En el valle del Indo, la explotación del campo y la cría de animales prosperó hace cuatro mil años. Más tarde, perdió impulso y retrocedió, para luego volver a arraigar, hace unos tres mil años, tanto a lo largo de los ríos Indo y Ganges como en otras zonas de subcontinente indio. En el África de hace cinco mil años, tal vez ya mucho antes, el Sahara (que era más húmedo y productivo que en la actualidad) fue escenario de la notable prosperidad de diferentes clases de rebaños. Hace aproximadamente tres mil años, las tareas agrícolas y ganaderas constituían ya una práctica bien establecida en el África occidental. Desde allí se extendieron por el África central y meridional. También en las dos Américas los campesinos tuvieron que amoldarse a una larga serie de condiciones nuevas, lo que explica que tanto en Mesoamérica como a orillas del Misisipí surgieran distintas variedades de maíz.

Con la multiplicación de las comunidades de agricultores y ganaderos, el ritmo del cambio se aceleró, porque tanto las labores del campo como las numerosas transformaciones que trajo consigo se propagaron a mayor velocidad que el antiguo sistema de caza y recolección. No puede decirse que las razones que determinaron que

las actividades agrícolas y ganaderas crecieran con tanta rapidez salten a la vista, dado que la vida campesina podía ser extremadamente dura, lo cual contribuye a explicar que los cazadores y recolectores sobrevivieran durante muchos milenios y que a menudo lo hicieran cohabitando además en el mismo entorno que los granjeros. En algunas regiones, como en Siberia y Australia, por ejemplo, las desventajas del sistema campesino superaban a sus ventajas, así que las comunidades de cazadores y recolectores prosperaron hasta la época moderna. Sin embargo, tanto en las zonas apropiadas para el cultivo y el pastoreo como en aquellas que podían acondicionarse para implantar ese tipo de subsistencia, o aun en las dominadas por una fuerte presión demográfica sobre los recursos disponibles, la vida de las comunidades de agricultores y criadores de ganado aventajaba en muchos aspectos a la de sus vecinos recolectores. Incluso la agricultura trashumante basada en la tala y la quema de los bosques podía mantener a veinte o treinta personas por kilómetro cuadrado, lo que multiplicaba por cien la densidad de población característica de los cazadores y recolectores que operaban en entornos similares.[10] Cuando la situación se volvía apurada, esta capacidad de soportar una mayor presión demográfica permitía, al menos por regla general, que las comunidades campesinas estuvieran en condiciones de movilizar una mayor cantidad de personas y recursos que los grupos de cazadores-recolectores. Podían superarles muchísimo en número, lo que, en caso de necesidad, les facilitaba una eventual victoria militar. A ello se debe que muy pronto, hace quizá cinco mil años, la mayoría de los seres humanos dependieran ya del trabajo campesino, y que las comunidades que habían abrazado esta forma de vida, junto con las masas populares cuyo sustento aseguraban, empezaran a dominar la historia de la humanidad.

A medida que fue extendiéndose, la práctica de la agricultura y la ganadería transformaron profundamente el entorno. Su empleo en la construcción de pueblos hizo que la masa forestal disminuyera en todas partes. Además, los campesinos araban la tierra, ahuyentaban

las plagas y arrancaban las malas hierbas. Debido a su propia naturaleza, la actividad agropecuaria exigía manipular el medio. Si los cazadores y recolectores se consideraban habitualmente enraizados en la biosfera, los granjeros en cambio veían el entorno como una entidad que era preciso gestionar, cultivar, explotar, mejorar e incluso conquistar. Y si por un lado el aprendizaje colectivo ofrecía a los agricultores y ganaderos el conocimiento necesario para manipular su entorno, por el otro las faenas del campo les proporcionaban el alimento y los flujos de energía precisos para multiplicar y transformar la región en la que se asentaban, ocupando zonas cada vez mayores y ejerciendo sobre ellas un poder que además de ir en aumento se aplicaba con una eficacia igualmente creciente.

El aprendizaje colectivo y los nuevos flujos de energía fueron, por tanto, los elementos impulsores del turbulento dinamismo histórico de la era agraria, y a ellos también cabe atribuir la larga serie de mutaciones registradas; que no solo resultaron perturbadoras, sino totalmente desconocidas en la anterior época paleolítica.

De cómo la actividad agropecuaria transformó la historia de los seres humanos

Al término de la última Edad de Hielo, y quizá durante unos cinco mil años, las aldeas de campesinos dominaron el paisaje de la fase agraria de la historia humana. Eran las megalópolis de la época, las comunidades más complejas, populosas y poderosas de la Tierra. Al propagarse la actividad agrícola y ganadera e ir aumentando el tamaño de los asentamientos, los pueblos y aldeas se multiplicaron hasta convertirse en las comunidades de seres humanos con mayor densidad de población. Si viviera usted en la era agraria, lo más probable es que fuera granjero o habitara en una comunidad de campesinos.

Estas densas comunidades constituían un fenómeno nuevo en la historia humana. Si las valorásemos en función de criterios modernos, las aldeas de campesinos podrían presentar a nuestros ojos un aspecto simple en extremo. Sin embargo, desde el punto de vista de lo que resultaba habitual en la época paleolítica, se trataba de verdaderos gigantes, tanto en términos sociales como políticos y culturales. Su concreción requería el empleo de nuevas tecnologías y exigía también un conjunto inédito de normas sociales y éticas, ideas renovadas sobre los modos de convivencia y fórmulas originales con las que intentar evitar el surgimiento de conflictos o determinar la manera de distribuir la riqueza entre los miembros de la comunidad. Si el antropólogo y psicólogo evolucionista británico Robin Dunbar acierta al afirmar que la evolución solo ha dotado al cerebro humano de una capacidad relacional limitada, ya que no puede gestionar los vínculos de ningún grupo que supere los 150 individuos, resulta inevitable deducir que la cohesión de las comunidades cuyo tamaño supere con mucho esa cifra exigirá disponer de un conjunto de tecnologías sociales totalmente novedosas.

Durante la primera mitad de la era agraria de nuestra historia, la mayoría de las aldeas campesinas estuvieron constituidas por comunidades independientes que, además de no relacionarse mucho con las poblaciones vecinas, eran también lo suficientemente pequeñas como para atender a su cohesión valiéndose solo de las tradicionales normas de parentesco. Pese a que el trasiego de personas, bienes e ideas entre las aldeas fuera cada vez más frecuente y abundante, aún no existían estados ni imperios, como tampoco había ni ciudades ni ejércitos. La aparición de las enormes sociedades complejas que han venido predominando en los últimos cinco mil años de la historia humana necesitó como requisito previo que la difusión de la actividad agrícola y ganadera hubiese adquirido la envergadura y el dinamismo suficientes para generar una masa crítica de individuos, recursos y nuevas tecnologías. Aun así, en las comunidades aldeanas de la primitiva era agraria se observan ya las raíces de las primeras civilizaciones agrarias.

Ya hemos visto que las sociedades recolectoras contaban con una reserva de conocimientos potenciales de muy diferentes tipos, incluida la información relativa a la gestión de las relaciones entre los integrantes de grandes grupos de personas. El potencial para que se produjera un incremento de la complejidad social, es decir, para que surgieran redes políticas, económicas y militares de grandes dimensiones, y para que se construyeran los inmensos edificios con que cuentan todas las civilizaciones agrarias, ya estaba presente tanto en las comunidades de cazadores y recolectores como en las poblaciones de los primeros granjeros.

La colina de Göbekli Tepe, en el sur de la Anatolia, ilustra de forma espectacular el potencial intelectual y tecnológico latente en las primeras comunidades de forrajeadores y campesinos. Los primeros datos sobre la ocupación de Göbekli Tepe tienen una antigüedad similar a la de los pueblos natufienses, aunque más tarde, hace entre doce mil y nueve mil años, el emplazamiento estuvo habitado de manera intermitente.[11] El yacimiento arqueológico contiene veinte círculos de piedra y unas doscientas columnas de piedra bellamente labradas, algunas de las cuales superan con mucho los cinco metros de altura y rondan las veinte toneladas de peso. Muchos de esos pilares muestran bajorrelieves con imágenes de aves provistas de pico y animales con garras. No hay ningún edificio destinado a servir de vivienda y, curiosamente, se aprecia que hay numerosas columnas que fueron enterradas siguiendo alguna clase de ritual. Los arqueólogos también han hallado indicios de que en ese emplazamiento se fabricaba cerveza, lo que podría ser otra señal de la práctica de actividades rituales (así como de la celebración de bacanales). Todo esto sugiere que Göbekli Tepe, al igual que Stonehenge en Inglaterra o el Cañón del Chaco en Nuevo México, era un centro ritual al servicio de las comunidades de los alrededores, quizá una suerte de primer ejemplo de estadio para unos Juegos Olímpicos o de gran sala de audiencias similar a las Naciones Unidas. Es posible que desempeñara también las funciones de observatorio. El enorme esfuerzo que supuso la construcción de

los círculos de piedra de Göbekli Tepe es una clara indicación de que en esa época, marcada ya por un rápido crecimiento demográfico, se concedía mucha importancia a los vínculos diplomáticos y tecnológicos que se tejían entre las diferentes comunidades. Tanto el tamaño de las columnas como la precisión y primorosa labor de las figuras, o el hecho mismo de que fuera necesario recurrir al trabajo de cientos de personas para esculpir y trasladar los grandes bloques de piedra, apuntan a la existencia de una organización social de una magnitud y una complejidad nuevas por completo. Esto resulta realmente sorprendente, pues lo más probable es que los constructores de estas primeras estructuras no fueran siquiera agricultores y ganaderos propiamente dichos, sino cazadores y recolectores acomodados y sedentarizados, como los natufienses.

A medida que las localidades aldeanas y sus redes de relaciones fueron aumentando de tamaño, las tradicionales reglas del parentesco comenzaron a ponerse en cuestión.[12] El crecimiento expansivo de los primeros caseríos de granjeros y la subsiguiente creación de lazos inéditos con los grupos vecinos —que en ocasiones daban lugar al surgimiento de verdaderos pueblecitos— hicieron que las normas que tradicionalmente habían regido los vínculos del parentesco y la familia tuvieran que modificarse o completarse con nuevas reglas sobre la propiedad, los derechos, las jerarquías y el poder. Los antiguos módulos sociales de cien o doscientas personas quedaron conectados a redes de mayores dimensiones cuya organización acabó supeditándose, inevitablemente, a un particular orden jerárquico. A medida que la actividad agrícola y ganadera va expandiéndose, empezamos a ver en todas partes la aparición de un conjunto de estructuras nuevas y más jerarquizadas superpuestas a las tradicionalmente asociadas con las comunidades aldeanas, cuya organización tendía a regirse por las normas de parentesco.

Una de las fórmulas de que disponemos para reconstruir la evolución de las relaciones y las jerarquías de un pueblecito de mil personas consiste en proyectar al pasado las reglas tradicionales del parentesco. Este es el posible desarrollo de la situación: si los

padres, abuelos y bisabuelos de un individuo determinado descendían al completo del hijo primogénito de las sucesivas generaciones, entonces ese individuo podía reclamar las prebendas asociadas con la antigüedad del linaje, tanto para sí mismo como para toda su familia. Los mecanismos de este tipo permitían ordenar familias y troncos genealógicos enteros en función de la antigüedad y primogenitura de sus ascendientes. Nos encontramos pues ante el inicio del sistema de clases y castas. No obstante, el talento también tenía su importancia. Dado que en las aldeas de gran tamaño la gente vivía inmersa en un conjunto de relaciones más estrechas, las disputas por el derecho al uso de las tierras, el disfrute de una herencia, el padecimiento de una agresión o la provocación de daños y perjuicios iban en aumento (lo que nos recuerda el similar incremento de las colisiones entre los protones de las masas de materia en contracción que generaron las primeras estrellas). Sin embargo, resolver las diferencias surgidas en una población de cierta envergadura requería de unas prácticas muy distintas a zanjar una pelea familiar. Los mediadores o jueces debían proceder con delicadeza y dar muestras de saber actuar con tacto e inteligencia —por no mencionar que también se les exigía experiencia—y, en ocasiones, poder recurrir a la fuerza para imponer su voluntad.

Los modernos estudios de las sociedades que viven en poblaciones pequeñas muestran que esos problemas pueden propiciar la aparición de formas sencillas de liderazgo, pues suele concederse un modesto grado de autoridad sobre el resto de los aldeanos a los individuos que destacan por revelarse particularmente generosos o enérgicos, poseer un gran conocimiento de las tradiciones y la ley, actuar de una forma particularmente piadosa o tener habilidades combativas. Si sus aptitudes descuellan en el terreno de la vida social y política, estas personas pueden llegar a convertirse en «grandes hombres», en cabecillas conocidos por su generosidad, su capacidad de liderar un grupo o sus dotes organizativas. Las jerarquías y rangos sociales basados en el linaje o la habilidad sentaron las bases para el establecimiento de las

distinciones de clase y de casta. De hecho, el perfil del poder imperial aparece ya prefigurado en los banquetes y riñas de las antiguas aldeas.

Al crecer el número de gente y de intercambios, la maquinaria del aprendizaje colectivo comenzó a operar con sinergia y poder crecientes. En muchos casos, las innovaciones daban lugar a la aparición de notables mejoras susceptibles de promover, en distintos ámbitos, el avance de los trabajos agrícolas y ganaderos, y en algunas ocasiones las novedades acabaron resultando revolucionarias. Dos descubrimientos en particular adquirieron una dimensión trascendente: la domesticación de los animales de gran tamaño y la práctica del regadío a gran escala.

Es muy probable que la domesticación de los animales se produjera en paralelo a la aclimatación de las primeras plantas al medio humano. Hasta es posible que los perros fueran amansados primero por las sociedades de cazadores-recolectores, ya que debieron de revelarse muy útiles tanto en las actividades cinegéticas como en las labores de guardia y custodia, con el posible añadido, incluso, de que en los períodos invernales su calor corporal contribuyera a aportar un cierto confort a las personas. No obstante, al principio, la domesticación de los animales no se pudo llevar a cabo con la suficiente eficacia. Los animales tenían que permanecer encerrados en cercados y era preciso alimentarlos, con un coste considerable, hasta el momento en que se les sacrificaba para aprovechar la carne, la piel, los huesos y los tendones. Hace unos seis o siete mil años, sobre todo en las regiones con grandes extensiones de pastos capaces de mantener grandes rebaños de reses, los labriegos y pastores comenzaron a desarrollar formas de obtener un rendimiento de los animales domesticados antes de sacrificarlos. Comenzaron por tanto a ordeñar a las vacas, a las yeguas, a las cabras y a las ovejas; a esquilar al ganado ovino y caprino; y a cabalgar en los caballos o a uncirlos a los carros para emplearlos como bestias de tiro. El arqueólogo Andrew Sherratt sostiene que estas técnicas novedosas constituyeron lo que él llama

la «revolución de los productos secundarios», porque en esta fase de su evolución los seres humanos aprendieron a extraer no solo frutos primarios de los animales domesticados (esto es, los recursos que conseguían cuando los mataban) sino también beneficios secundarios (es decir, la energía y los recursos que podían proporcionarles mientras estaban vivos). Hasta la Edad Moderna, el empleo de estas potentes tecnologías quedó circunscrito a la región de Afro-Eurasia, porque en las Américas, el exterminio de muchas de las especies de la megafauna original había reducido drásticamente el número de animales susceptibles de ser domesticados. Sin embargo, en algunas regiones de Afro-Eurasia (como por ejemplo en el Asia central, el Oriente Próximo y el norte de África) el aumento de la productividad gracias a esos réditos secundarios fue tan grande que empezaron a surgir comunidades cuyo sustento dependía por completo del ganado. Y al verse obligados a seguir a los animales en su búsqueda de nuevos pastos y a vivir en tiendas de campaña, terminarían recuperando el estilo de vida nómada. Englobamos a estos grupos bajo la denominación de «pastores nómadas». La movilidad hizo que estos pastores nómadas actuasen como perfectos elementos de conexión entre las regiones, por distantes que se hallaran unas de otras, y en último término los convirtió en propagadores de ideas, tecnologías, mercancías e incluso enfermedades, pues las dispersaron, junto con los miembros de sus propias comunidades, por todos los territorios de Afro-Eurasia a través de lo que ha dado en denominarse las Rutas de la Seda.

La irrupción de los sistemas de riego a gran escala tuvo resultados igualmente transformadores. En Mesopotamia, la presión demográfica empujó a un creciente número de campesinos afincados en las húmedas montañas del Creciente Fértil hasta las áridas tierras meridionales que se abren al pie de esas cordilleras, en lo que hoy es el centro de Irak. Eso les llevó a instalarse en una región atravesada por dos grandes ríos, el Tigris y el Éufrates: una zona en la que llueve tan poco que para dedicarse a la vida agrícola hay que desviar el agua de los ríos. Al principio, los recién llegados

granjeros se contentaron con excavar personalmente una sencilla acequia, pero al final todas las comunidades optaron por colaborar en la construcción y el mantenimiento de complejos sistemas de canales y conductos. La materialización del mayor de esos sistemas exigió el esfuerzo de miles de trabajadores, así como un sólido liderazgo y una buena coordinación. Sin embargo, los beneficios fueron inmensos, puesto que en esa zona las periódicas inundaciones de los grandes cursos de agua habían estado fertilizando el suelo durante miles de años. Por consiguiente, la actividad agrícola y ganadera consiguió avanzar a pasos agigantados en las regiones provistas de condiciones apropiadas para el regadío, de entre las cuales cabe destacar el norte de la India, China, el sureste de Asia, y, ya al final del período, algunas zonas de las dos Américas. La agricultura de regadío se reveló enseguida capaz de sostener a poblaciones muy numerosas, pero también requería una creciente cooperación social, así que su práctica incentivó el establecimiento de vínculos muy sólidos entre las distintas poblaciones campesinas y acabó por crear una larga serie de tejidos sociales y políticos de dimensiones muy superiores a las conocidas hasta entonces.

La conjunción de la mejora de los métodos de cultivo, el perfeccionamiento de los sistemas de cría de animales y la propagación de la actividad agrícola y ganadera disparó las cifras demográficas. Se habían necesitado al menos cien mil años para que la población humana alcanzara, a finales de la última Edad de Hielo, los cinco millones de individuos. Hace unos cinco mil años, el número de seres humanos se cuadriplicó y alcanzó la asombrosa cifra de veinte millones de almas, poco más o menos. Y hace dos mil años el género humano contaba ya con doscientos millones de personas, es decir, cuarenta veces el número registrado en las postrimerías de la última era glacial.

Con todo, la gráfica de la progresión demográfica no describió en ningún caso una curva estable. Las catástrofes interrumpieron en todas partes el proceso. La Enfermedad, el Hambre, la Guerra y la

Muerte (es decir, los Cuatro Jinetes del Apocalipsis) encontraron terreno abonado en la era agraria. Como ya hemos señalado, las aldeas de labriegos y pastores, a diferencia de los campamentos nómadas, acumulaban gran cantidad de desperdicios que atraían toda clase de insectos y animales perniciosos, de modo que las enfermedades se propagaban con rapidez. Y allí donde brotaban enfermedades nuevas (infecciones ante las cuales nadie contaba con inmunidad, como la viruela) no era raro que el mal se llevara por delante a la mitad de la población. Los agricultores y ganaderos estaban también más expuestos a las hambrunas que los cazadores y recolectores, dado que cultivaban muy pocas variedades de plantas. Cuando los alimentos empezaban a escasear, su único recurso eran las hierbas silvestres, las bellotas y la corteza de los árboles, y con eso la gente no solo no podía resistir demasiado tiempo, sino que los más jóvenes y los más viejos eran los que peor lo pasaban y los primeros en morir. A medida que fue aumentando la población, las aldeas empezaron a pelear por la tierra, el agua y otros muchos recursos. Esas batallas equivalían a pedir la comparecencia del tercer jinete apocalíptico, la Guerra, que podía llegar a resultar más desastroso que la enfermedad y la hambruna, pese a que muy a menudo cabalgara en su compañía. Los seres humanos siempre habían combatido unos con otros, pero en las sociedades agrícolas y ganaderas participaba mucha más gente en los conflictos y además empleaban armas cada vez más letales, sobre todo a partir del momento en que los bandos enfrentados empezaron a disponer de lanzas metálicas, construir carros y cuadrigas y a servirse de máquinas de asedio. El cuarto jinete, la Muerte, cerraba el cortejo de sus tres predecesores.

Para bien o para mal, la historia de la humanidad había entrado en una era presidida por un mayor dinamismo, en una edad en la que el cambio iba a ser el único factor constante. Conforme fuera cuajando el crecimiento de la población de las comunidades

humanas, junto con su tamaño y su complejidad, irían poniéndose también los cimientos de las civilizaciones agrarias llamadas a dominar los últimos cinco mil años de nuestra historia.

Capítulo 9

LAS CIVILIZACIONES AGRARIAS

> «En aquella época las moradas de Agadé estaban llenas de oro, sus relucientes casas rebosaban de plata, a sus graneros habían llevado cobre, estaño, planchas de lapislázuli, y sus silos repletos [...] los muelles en que atracaban los barcos hervían bulliciosos [...] sus murallas rozaban el firmamento, como las montañas [...] sus escotillas—como el Tigris— vertían al mar sus aguas, y la sagrada Inanna abría de par en par sus puertas.»
>
> Poema sumerio, a partir de la traducción inglesa de S. N. Kramer

Las aldeas de agricultores y ganaderos, así como sus respectivas poblaciones, proporcionaron el grueso de los recursos humanos y materiales que precisaron las civilizaciones agrarias destinadas a predominar en los últimos cinco mil años de historia de la humanidad. Si observamos lo que ocurría entre bastidores, tras los ejércitos y las ciudades imperiales, en las recámaras de los templos y las pirámides, en el ajetreado tráfico de las caravanas y las flotas, entre las líneas e imágenes de la literatura y el resto de las artes, en los conceptos filosóficos y religiosos de las civilizaciones agrarias, encontraremos, ocultas en tan abigarrado trasfondo y muchas veces al margen de los feudos presuntamente centrales de la acción, miles de comunidades campesinas, así como una vasta población, todavía más empobrecida, de vagabundos y desposeídos, abocados en muchos casos a la esclavitud. Las personas pertenecientes a estas clases discriminadas eran precisamente quienes producían la mayor

parte de los cereales y la carne, muchos de los tejidos de lino, hilo y seda, y la práctica totalidad del trabajo (tanto libre como servil) que requerían las grandes ciudades. Con su producción y su trabajo se sufragaban los gastos de las calzadas, los palacios, los templos, las sedas, los vinos y las joyas de los individuos acaudalados, utilizándose al mismo tiempo a hombres y caballos como fuerza bruta en los ejércitos. Las civilizaciones agrarias no solo movilizaban el capital humano y material, también explotaban la energía producida por las aldeas agrícolas y ganaderas para crear un conjunto de estructuras sociales mucho más imponente y complejo que el construido en las primeras comunidades humanas. Y además, como cualquier otro organismo viviente, recababan y aplicaban información, pues el incremento de esta les permitía acceder a una mayor cantidad de energía y a nuevos recursos.

La aparición de las civilizaciones agrarias suponía cruzar un umbral más en la senda de creciente complejidad de la historia de los orígenes. Sin embargo, dado que el factor que había puesto los cimientos en que se sustentaban las civilizaciones agrarias había sido la evolución experimentada por las comunidades de campesinos a lo largo de varios milenios, no debemos considerar su surgimiento como un umbral realmente novedoso, sino más bien una especie de fase secundaria del umbral propiciado por la invención de la agricultura.

Para calibrar el significado que tuvo la irrupción de las civilizaciones agrarias es mejor no centrarse en la crónica de una u otra civilización específica, pues obtendremos mejores resultados fijándonos en las interrogantes que hemos venido planteando hasta ahora al exponer la historia moderna de los orígenes: ¿cuáles eran las condiciones Ricitos de Oro que hicieron posible la aparición de esta nueva forma de complejidad? ¿Qué nuevas propiedades afloraron en las civilizaciones agrarias? ¿Y en qué flujos de energía se sustentaron esas nuevas propiedades?

LOS EXCEDENTES, LAS JERARQUÍAS Y LA DIVISIÓN DEL TRABAJO

Pese a las hambrunas, las enfermedades y las guerras, en el transcurso del Holoceno las poblaciones agrícolas y ganaderas se multiplicaron y extendieron debido sobre todo a que, en la mayoría de los casos, producían más de lo que precisaban. Estos asentamientos transformaban la energía procedente de la luz solar en excedentes. Esto suponía una enorme diferencia respecto de las sociedades de cazadores y recolectores, que, si bien almacenaban conocimientos, rara vez tuvieron la necesidad de acumular excedentes porque los alimentos y las materias primas que precisaban se encontraban a su disposición en todas partes. ¿Qué sentido tiene afanarse en las duras labores campesinas, se preguntan hoy los cazadores y recolectores del desierto del Kalahari, habiendo como hay tantísimas nueces de mongongo con las que alimentarse?[1] En las sociedades de forrajeadores, la lenta acumulación de conocimientos contribuía más a animar a los grupos a emigrar a nuevos entornos que a atesorar bienes materiales. En cambio, a las sociedades agrícolas y ganaderas no les quedaba más remedio que almacenar parte de lo que producían, y en grandes cantidades, pues a menudo la cosecha de los plantíos y la matanza de los animales, que se verificaba en pocas semanas, debía consumirse o procesarse a lo largo de todo un año y a veces incluso más. Por consiguiente, todas las comunidades campesinas disponían de casas, graneros, establos y campos cubiertos de productos destinados a un consumo futuro.

A medida que aumentaba la productividad, los excedentes empezaron a superar las necesidades anuales de quienes los producían. El exceso de personas, el superávit de alimentos, las mercancías sobrantes y la energía no utilizada pasaron a convertirse en otras tantas formas nuevas de riqueza, lo que a su vez suscitó la siguiente pregunta: ¿quién controlaría (y disfrutaría) de esa abundancia? Con el paso del tiempo surgirían unas minorías, numéricamente reducidas pero poderosas, dedicadas a movilizar

este tipo de remanentes. Las estructuras que crearon para activarlos, a menudo valiéndose de burdas formas de coacción, terminarían por transformarse en los músculos y los tendones con los que las civilizaciones agrarias iniciaron su segunda andadura.

La disponibilidad de una riqueza excedentaria llevaba aparejada la existencia de una superabundancia de personas. Al aumentar la productividad, quedó claro que no era preciso que todo el mundo se dedicara a las labores del campo, así que surgieron nuevas funciones sociales. Mucha gente se vio obligada a vagar por los caminos o quedó reducida a la esclavitud, pero otros individuos que tampoco trabajaban la tierra acabaron por controlar gran parte del excedente de riqueza de la sociedad al revelarse capaces de desempeñar distintas funciones sociales útiles. Unos dedicaron la totalidad del día al sacerdocio, otros se entregaron a la alfarería y otros más se emplearon como soldados, filósofos o gobernantes. Una vez especializadas, estas personas se convirtieron en expertos en el estrecho ámbito de sus particulares funciones. Sin embargo, la división del trabajo creó también nuevas formas de dependencia. La multiplicación de las funciones sociales hizo que se incrementara también la interconexión, la diferenciación, la interdependencia y la complejidad de las sociedades humanas, como en su día les había ocurrido ya a los primeros metazoos. Aparecieron así nuevas estructuras destinadas a enlazar todos esos elementos recién surgidos: una especie de equivalentes sociales de los esqueletos, los músculos y los sistemas nerviosos de los grandes animales.

Por regla general, los individuos especializados dependían de estas estructuras de enlace mucho más que los granjeros, ya que estos últimos podían cubrir sus propias necesidades alimentarias. Los arqueólogos han estudiado el rastro que ha dejado la evolución de esta división del trabajo. En Mesopotamia, la alfarería constituye un ejemplo clásico de estudio de un caso práctico. Las primeras vasijas de barro son sencillas y peculiarmente características de cada productor, y lo más probable es que en su mayor parte se elaboraran en los hogares campesinos corrientes. Sin embargo, hace

aproximadamente seis mil años empezamos a encontrar talleres especializados en los que destaca la presencia de uno o más tornos de alfarero. Los artesanos que trabajaban en ellos producían grandes cantidades de cuencos, platos y jarras, todos ellos de formas estandarizadas, y luego los vendían en una amplia zona geográfica. Estas mercancías tenían el aspecto de lo que hoy consideraríamos productos salidos de las manos de profesionales plenamente especializados, y desde luego estos primeros alfareros no solo invertían recursos en sus equipos, sino también una considerable cantidad de energía en un aprendizaje que sin duda no era breve. La especialización estimuló la aparición de una serie de técnicas y destrezas nuevas, lo que implica que no solo debemos ver en ella un indicador de la existencia de un cambio tecnológico, sino también un elemento impulsor de esa transformación. Pongamos un ejemplo: los alfareros necesitaban hornos para cocer sus cántaros, y con el tiempo empezaron a construir sistemas más eficientes y capaces de operar a temperaturas más altas, con lo que se obtenían mejores acabados. Ahora bien, la disponibilidad de unos hornos más potentes era precisamente lo que requería la separación del cobre, el estaño o el hierro de los minerales en bruto en los que se hallaban insertos, y esto permitió moldear, curvar y martillear los metales para fabricar con ellos útiles domésticos, adornos y armas. Tanto los artesanos del cobre como los orfebres, los plateros y los herreros utilizaron las tecnologías inicialmente empleadas por los alfareros profesionales.

Cuando el volumen de excedentes creció, se multiplicaron también las especializaciones. Hace cinco mil años, en la ciudad de Uruk, en la porción meridional de Mesopotamia, alguien confeccionó una lista con cien actividades laborales diferentes: una suerte de relación normalizada de las distintas profesiones. Se trataba, por supuesto, de un documento de gran importancia y muy conocido, porque durante muchos siglos los aprendices que aspiraban a convertirse en futuros escribas copiaron listas similares para adquirir práctica en el oficio. Organizada de forma jerárquica, la lista incluye

la actividad de los reyes y los cortesanos, así como la de los sacerdotes, los recaudadores de impuestos, los copistas, los plateros, los alfareros e incluso los artistas del mundo del espectáculo, como los encantadores de serpientes. A diferencia de los granjeros, los ceramistas y los encantadores de serpientes no producían ni alimentos ni cuero, y tampoco fibras vegetales o animales, así que para alimentarse y vestirse, ya fuera a sí mismos o a sus familias, debían trocar sus productos y servicios por alimentos y otros productos básicos. Por esta razón, el comercio, los mercados y los objetos y prácticas destinados a la actividad contable, como las monedas y la escritura, se revelaron tan vitales para las sociedades complejas como puedan serlo las arterias y las venas para el cuerpo humano. Estas estructuras permitieron la transferencia de objetos, y la transmisión de los flujos de energía que tales cosas representaban, entre personas y grupos. Incluso los individuos especializados en cuestiones religiosas a los que solemos denominar «sacerdotes» tuvieron que aceptar el trueque de sus servicios espirituales para cubrir sus necesidades, alimenticias y de otro tipo. Allí donde existen templos, hay también ofrendas y donaciones.

La productividad de la agricultura y el número de personas extra que cada campesino pudiera alimentar eran los factores que limitaban el grado de especialización posible. En la mayor parte de las civilizaciones agrarias se necesitaban cerca de diez granjeros para mantener a una persona que no se dedicara a las labores del campo. Esto explica que quienes araban la tierra o criaran ganado fueran mayoría. De hecho, incluso los habitantes de las primeras ciudades adquirieron la costumbre de sembrar cultivos en sus patios traseros o extramuros de la localidad. Ahora bien, pese a que las poblaciones de la época estuvieran integradas sobre todo por granjeros y a que fueran ellos quienes aportaran el grueso de los recursos a sus respectivas comunidades, lo cierto es que la importancia de los individuos especializados creció al mismo ritmo que la interdependencia de las sociedades. Fueran caprichos o herramientas para sus granjas, los campesinos empezaron a

comprar cosas, y con ello no tardaron en descubrir que esas transacciones les obligaban a tratar con vendedores ambulantes, recaudadores de impuestos, terratenientes y encargados. El traslado de las mercancías y los recursos de las pequeñas poblaciones a las grandes ciudades, y viceversa, exigía la cooperación de varios profesionales, todos ellos especializados en diferentes tramos de la operación y de la vida social en general: unos producían las monedas que luego se empleaban en los mercados, otros fabricaban los arados de metal y las espadas que utilizarían los granjeros y soldados, y un tercer grupo se encargaba de la contabilidad, de hacer cumplir las leyes, de rezar a los dioses en nombre del conjunto de la población o de organizar y gobernar a la comunidad. Los especialistas se convirtieron enseguida en el puntal y el cemento llamado a consolidar la civilización agraria como tal. Esto es lo que explica que, en última instancia, terminaran organizando y dominando al resto de la sociedad.

El incremento de la especialización trajo consigo un crecimiento paralelo de la desigualdad. Las primeras comunidades agrícolas y ganaderas eran razonablemente igualitarias, condición que conservarían incluso después de superar el antiguo máximo comunitario, comprendido entre 150 y 200 personas. La ciudad neolítica de Çatalhöyük (en la actual Turquía) vivió su mejor época hace ocho o nueve mil años, y los estudios arqueológicos muestran que el tamaño de las viviendas domésticas apenas experimentó variación alguna, pese a que en su apogeo la ciudad acogía a varios miles de personas. Sin embargo, al final del ciclo histórico de la urbe advertimos la aparición de minorías acomodadas, y en número creciente. Fijémonos en un ejemplo tomado al azar: cerca de la ciudad búlgara de Varna, a orillas del mar Negro, hay una necrópolis de seis mil años de antigüedad que contiene más de doscientas tumbas. En las fosas de muchos de los fallecidos no aparece ningún objeto, o solo unos cuantos de carácter muy sencillo, pero en aproximadamente el 10 % de ellas se han hallado muchísimas cosas. En uno de los sepulcros había más de mil objetos, en su mayor parte

de oro, y de entre ellos destaca la presencia de brazaletes y hachas de cobre, e incluso una fíbula peniana.[2] Se observa ya, pues, la vertiente triple de la riqueza que no es tan familiar: hay una élite (cerca del 10 % de la población) que la constituye, un individuo en la cúspide social y una inmensa mayoría de personas abocadas a una situación próxima a la subsistencia. Cuando los arqueólogos hallan sepulcros infantiles provistos de ofrendas de muy elevado coste pueden estar seguros de que se encuentran ante no solo una estratificación jerárquica, sino una organización en la que las jerarquías se transmiten de generación en generación, porque es imposible que un niño alcance por sí solo una posición social elevada. Esto constituye a su vez una señal de la existencia de un sistema aristocrático y de castas. Los vastos proyectos arquitectónicos, como los que suponen la construcción de palacios, pirámides, zigurats y templos, también nos indican que había individuos con el poder suficiente para organizar el esfuerzo laboral de un gran número de personas.

Con el incremento de los gradientes de poder y de los privilegios de algunos individuos se hicieron necesarias nuevas estructuras sociales para sostenerlos. Alguien tenía que imponer orden en los mercados, castigar a los rateros y a los ladrones, llevar la contabilidad fiscal, y organizar tanto a los campesinos como a los vagabundos y esclavos para formar con ellos las cuadrillas de obreros que levantaran los palacios y garantizaran el mantenimiento de los canales. Las sociedades complejas también necesitaban de especialistas religiosos capaces de conseguir que los dioses protegieran a la población, evitándoles enfermedades y proporcionándoles lluvia en abundancia. Si estas estructuras fallaban, todo el mundo sufría, y por eso hasta los más desfavorecidos optaban casi siempre por obedecer a sus señores.

Los antropólogos han estudiado la aparición de las jerarquías en sociedades modernas de dimensiones reducidas, como las existentes por ejemplo en Melanesia, en el Pacífico occidental, donde los personajes públicos con un poder notable (a los que los

antropólogos llaman «grandes hombres» o «jefes»), obtuvieron esa capacidad de acción gracias al respeto y el respaldo leal de la familia, los aliados y los seguidores. No obstante, su poder siempre era precario. Si no distribuían de manera suficiente la riqueza y los privilegios que gestionaban, conservando así la adhesión de sus partidarios, podían perder con rapidez tanto su posición como su riqueza; y en ocasiones, incluso la vida. ¿Por qué respaldar a alguien que no puede obligarte a nada y que además no te reporta ningún beneficio?

Al final, las grandes sociedades asistieron al surgimiento de muchos más dirigentes poderosos. Estos nuevos líderes regían las vidas de cientos de miles de personas y controlaban unos flujos de riqueza tan enormes que tanto ellos mismos como sus aliados se vieron en condiciones de pagar la fuerza necesaria para, en caso necesario, imponer su voluntad a las bravas. De hecho, el uso de la fuerza como medio para la obtención de mano de obra, productos o riquezas se convirtió en una realidad omnipresente en las civilizaciones agrarias. A eso se debe que la esclavitud y los trabajos forzados fuesen tan comunes en las civilizaciones agrarias. Además, los métodos empleados para extraer riqueza de los campesinos y usarlos como mano de obra muestran que a menudo sus condiciones de vida eran apenas mejores que las de los esclavos. Un maravilloso documento encontrado en Egipto y escrito a finales del segundo milenio a. C. nos permite entrever los sistemas habituales para obligar a los campesinos a ceder su excedente de recursos.[3] El autor, un escriba, explica los motivos que le inducen a considerar buena la existencia de los miembros de su profesión. Pensad, dice, en la dura labor del campesino, en las largas horas que debe pasar, haga calor o frío, para conseguir que los campos den fruto, o en el tiempo que debe dedicar al cuidado del ganado, a la reparación de las herramientas que precisa para su actividad, o aún al remozado de los edificios que utiliza. E imaginad después qué puede ocurrir cuando los recaudadores de impuestos se presentan ante él acompañados de un cuerpo de guardia armado.

> Uno le espeta [al campesino]: «Danos el grano». «No tengo nada», [responde el interpelado]. Le golpean salvajemente. Le atan, le arrojan al pozo, le sumergen cabeza abajo. Cubren de ligaduras a su esposa en su presencia. Ponen grilletes a sus hijos. Sus vecinos les abandonan y salen huyendo.

Tal vez se haya deslizado un poco hacia la caricatura, pero disponemos de muchas pruebas que confirman que en todas las civilizaciones agrarias se usaron distintas estrategias de extorsión, tanto para mantener el orden como para arrancar trabajo y recursos a la generalidad de la población.

Solemos llamar «estados» a las estructuras de poder capaces de ejercer este tipo de control en una zona de cierta extensión. Los estados surgieron en aquellas sociedades cuya población y riqueza era lo bastante grande como para disponer de pueblos y ciudades, así como de un gran número de aldeas agrícolas y ganaderas, amén de una abundante cantidad de fuerza de trabajo extra susceptible de dotar de efectivos a los ejércitos y a los sistemas burocráticos, y de atender además al coste de su mantenimiento.

De los pueblos a las ciudades y a sus gobernantes: la movilización de recursos y el nuevo nivel trófico

A medida que aumentaron las poblaciones y los excedentes, crecieron también las dimensiones de las comunidades humanas. Además, como ya había sucedido con las personas, las comunidades también empezaron a especializarse. Algunas aldeas ensancharon sus límites y comenzaron a desempeñar nuevos papeles, bien por encontrarse situadas cerca de las rutas comerciales, bien por estar en disposición de controlar algún punto estratégico por el que cruzar un río, bien por disponer de mercados capaces de atraer a compradores y vendedores de otras poblaciones, bien por hallarse en las inmediaciones de algún centro religioso relevante. Çatalhöyük, en el sur de Anatolia, se elevaba en una región de magníficas tierras

de cultivo, pero contaba además con yacimientos de obsidiana, el duro vidrio volcánico que empleado en esa época para fabricar los mejores y más afilados instrumentos cortantes del Neolítico. Es posible que sus habitantes comerciaran con la obsidiana a gran escala, haciéndola llegar incluso hasta Mesopotamia. Jericó, uno de los asentamientos ininterrumpidamente habitados más antiguos del mundo, acogió a sus primeros pobladores en tiempos de los natufienses porque contaba con un pozo que jamás se secaba. Hace nueve mil años, el desarrollo de Jericó acabó convirtiéndolo en una ciudad cuya cifra demográfica se acercaba quizá a las tres mil personas.

A medida que fueron creciendo, hubo casos en que las ciudades empezaron a ofrecer nuevos servicios, trabajos y mercancías. Atrajeron así a mucha gente, y con el tiempo adquirieron poder y dominaron a las aldeas y poblaciones pequeñas de los alrededores. Hace cinco mil años había ya pueblos que habían pasado a ser ciudades y se habían transformado en enormes comunidades diversificadas que, además de basar su prosperidad en la contribución de las aldeas y pueblecitos circundantes, conseguían concentrar en sus calles a una gran cantidad de especialistas. Lo que explica que en todas las civilizaciones agrarias las ciudades se hayan comportado como verdaderas dinamos tecnológicas, comerciales y políticas y que lograran atraer a la gente procedente de la campiña de las inmediaciones es justamente la variedad de técnicas, oficios, mercancías y personas que se congregaban en ellas.

La aparición de las ciudades y de los estados señala el inicio de una transformación radical de las sociedades humanas.

Los estados tradicionales eran muy distintos a los modernos. La mayor diferencia se refiere al hecho de que los tradicionales carecían de las tecnologías de comunicación y de los aparatos burocráticos que permiten a los estados modernos asomarse a la vida de todos sus ciudadanos. Los gobernantes tradicionales podían llevar a cabo acciones contundentes en el ámbito local, pero hacer llegar una orden a las provincias periféricas podía requerir semanas o meses, y

otro tanto para conocer el resultado de semejante misión. Por lo tanto, lejos de los principales centros de población el poder de los gobernantes dependía de un impreciso conjunto de redes jerarquizadas de señores locales que en muchas ocasiones gobernaban un territorio propio y lo hacían como si poco menos que un feudo independiente se tratara. No obstante, los primeros estados surgieron con el ímpetu de un fenómeno nuevo en la historia de la humanidad. Todos ellos se arrogaron el derecho de movilizar la riqueza de las comunidades, villas y ciudades campesinas, ofreciéndoles a cambio un cierto nivel de protección. Como afirma el teórico político inglés Thomas Hobbes en su *Leviatán*, redactado en 1651, el derecho de distribuir recursos «compete, en todos los géneros de gobierno, al poder soberano. En efecto, donde el estado no se ha constituido, existe, como hemos manifestado anteriormente, una situación de guerra perpetua de cada uno contra su vecino».* De hecho, las élites tradicionales debían parte de su poder a la intrínseca debilidad y aislamiento de las comunidades agrícolas y ganaderas tradicionales. Como también señaló Karl Marx, la unidad de los campesinos no era superior a la de las patatas de un saco,[4] y esto les exponía a toda clase de atropellos porque incluso un gobernante sumamente débil podía imponer su voluntad, aldea por aldea, si disponía de un pequeño grupo de matones. Este desigual equilibrio de poder contribuye a explicar que, durante muchos miles de años, hayan estado surgiendo pequeños grupos de gobernantes capaces de dominar, ayudados por un reducido número de funcionarios, a grandes poblaciones de campesinos.

El capítulo más conocido de la historia de las primeras ciudades, los estados primigenios y las civilizaciones agrarias más primitivas es el que se produjo en Sumeria, en la región meridional de Mesopotamia, donde hace cinco mil quinientos años surgió un importante grupo de ciudades. Se afirma con frecuencia que la ciudad de Uruk, al sur de Mesopotamia, fue la primera ciudad de la historia. Era un puerto fluvial, levantado a orillas del río Éufrates. Al

igual que la mayoría de las ciudades mesopotámicas, Uruk dependía de los complejos y bien gestionados sistemas de regadío alimentados por los principales cursos de agua de la zona. No obstante, la urbe también bordeaba las marismas del delta meridional del río. De hecho, quizá su prosperidad se viera impulsada por un período de climas crecientemente secos que obligó a los pobladores de las aldeas circundantes a emigrar a las ciudades, que disponían de unos sistemas de riego muy cuidados. Hace cinco mil quinientos años, Uruk contaba con una población de diez mil habitantes, asentada a ambos lados del Éufrates. Doscientos años más tarde es probable que albergara ya a nada menos que cincuenta mil vecinos, repartidos en un área de unos dos kilómetros cuadrados y medio.[5] En algún momento de su historia, el río Éufrates cambió su curso y empezó a fluir a un costado de la ciudad.

Quizá una ciudad de cincuenta mil habitantes no resulte muy impresionante en nuestros días, pero en su tiempo Uruk era realmente un monstruo, tal vez el mayor asentamiento humano conocido. Contaba con dos vastos complejos de edificios religiosos, lo cual significa que debió de acoger a una sucesión de sacerdotes o de reyes muy poderosos, capaces de movilizar como mano de obra a miles de personas, muchas de ellas en régimen de esclavitud. En Uruk había talleres que fabricaban objetos de gran belleza, y también silos de grano y almacenes para las mercancías valiosas. Algunos relatos pocos siglos posteriores nos permiten hacernos una idea de lo que hubiéramos visto de en caso de visitar Uruk en la época en que oficiaba ya como capital del rey Gilgamesh, héroe del primer poema épico que se haya escrito nunca. Contemplaríamos grandes complejos presididos por templos y palacios reales, pasearíamos por jardines, calles estrechas y callejones poblados de talleres, posadas y santuarios. La ciudad estaba rodeada por una muralla de ladrillos cerámicos y recorrida por un conjunto de canales que la comunicaban con el puerto y las tierras de cultivo de las inmediaciones. En la epopeya de *Gilgamesh*, dice el rey: «Un tercio del total es ciudad, un tercio huertos y otro tercio tierra marginal,

con el recinto de la diosa Ishtar».* Los arqueólogos han encontrado productos de un estilo similar al de los fabricados en Uruk en regiones tan alejadas de la urbe como la Anatolia y Egipto, lo que sugiere que los comerciantes de la ciudad comerciaban en un amplísimo espacio geográfico.

Hace unos cinco mil años apareció en Uruk el primer texto conocido, escrito sobre unas tablillas de arcilla encontradas en los templos de Eanna. El aumento de la complejidad conllevaba un incremento de la información, y la escritura era la última tecnología, la que permitía que los ricos y los poderosos llevaran un registro de las crecientes cantidades de recursos y flujos de energía de que disponían. En casi todos los casos, los primeros escritos mesopotámicos son simples inventarios: tal casa o señor posee tantas vacas y toros, tantas ovejas, tantas balas de lino, tantos esclavos... Estas relaciones contables nos indican que estamos en un mundo marcado por el rápido aumento de la desigualdad, en un universo en el que las redes de gobernantes, aristócratas y funcionarios controlan un vasto conjunto de flujos de información y de poder que les permiten movilizar la energía y tener a su servicio un importante número de esclavos, campesinos y artesanos.

Un maravilloso artefacto conocido con el nombre de «Estandarte de Ur» y del que en el Museo Británico puede contemplarse una reconstrucción, nos permite tener una idea más precisa de cómo era la vida en las ciudades de la Mesopotamia meridional de hace prácticamente cinco mil años. El Estandarte de Ur es un objeto en forma de caja que quizá formara parte de un instrumento musical, aunque también es posible que fuera llevado solemnemente en procesión; lo cierto es que no sabemos con seguridad cuál pudo haber sido su verdadera función. En sus laterales aparecen unas imágenes elaboradas mediante mosaicos hechos con conchas procedentes del golfo Pérsico, lapislázuli de Afganistán y trozos de piedra caliza roja de la India. Una parte del relato gráfico muestra la vida de la ciudad de Ur en tiempos de paz. También puede verse la figura de un personaje que parece ser un rey, flanqueado por un

grupo de dignatarios pudientes. Todos ellos asisten sentados a un banquete en el que un cantante acompañado de una lira les ofrece una serenata. El artífice de este objeto representa al rey y a los nobles a un tamaño mayor que el de los sirvientes, una convención artística que resalta su preeminencia jerárquica y su relevancia social. En los paneles inferiores vemos una fila de individuos que llevan mercancías y ganado a la ciudad, quizá para el banquete. Es un ejemplo que ilustra claramente el bombeo de los excedentes generados por los campesinos, que los transportan hasta los peldaños superiores, donde son consumidos por los grupos de la élite. La otra cara del estandarte nos presenta la situación de una Ur en guerra y nos permite identificar algunas de las fuerzas que mantenían vivas esas acusadas diferencias de riqueza y poder. En la parte superior hay un individuo más alto y corpulento que el resto, lo que nos induce a pensar, sin mucha posibilidad de error, que se trata de un rey. Debajo aparece una larga hilera de militares, aparentemente ataviados con el uniforme oficial, así como un grupo de cabecillas del ejército montados en carros tirados por asnos. Algunos de ellos parecen pasar por encima de un soldado enemigo, y otros arrastran a prisioneros que, desnudos, dejan a la vista las evidentes marcas de sus heridas.

Las ciudades de la Mesopotamia meridional de hace cinco mil años son una espléndida representación del tipo de sociedad llamado a dominar la realidad histórica de los dos o tres milenios inmediatamente posteriores. El control de una serie de ejércitos tan costosos como bien equipados permitió a los gobernantes y las élites en que se apoyaban rechazar a los enemigos exteriores y conservar los gradientes de poder y riqueza de los que dependía su propia posición y abundancia. Como ya vimos en el caso de las bombas de protones —que mantienen los gradientes de energía con los que operan las membranas celulares—, también los soldados y los séquitos armados de los aristócratas desempeñaban la función de preservar los gradientes de persuasión y coerción con los que se establecía el sistema de absorción de riqueza que partía de las

aldeas y llegaba a las ciudades y a los gobiernos, pasando por las poblaciones de mediano tamaño. Las imágenes de estas poderosas jerarquías, que nos muestran a unos reyes envueltos en magníficas vestiduras y a un corrillo de señores en actitud amenazadora frente a sus enemigos y sus súbditos, es una iconografía que figura en todas las civilizaciones agrarias.

Si consideramos las cosas desde el punto de vista ecológico, advertiremos que la aparición de los estados y sus gobernantes añadió un último escalón a la cadena alimentaria, un nuevo nivel trófico. Ya hemos visto que la energía solar penetra en la biosfera por medio de la fotosíntesis y que después pasa de las plantas a los herbívoros y de estos a los carnívoros. También hemos señalado que la mayor parte de esa energía acaba desperdiciándose en los distintos niveles de la cadena trófica, como si el sistema cobrara una suerte de gravamen por ocuparse de la recogida de basura. Esto reduce de manera muy notable la cantidad de energía que puede emplearse en el mantenimiento de los niveles superiores, lo que a su vez explica que haya muchos menos leones que antílopes. La agricultura puso al alcance de los seres humanos un mayor volumen de recursos, y así los estados pudieron añadir un nuevo nivel trófico a la cúspide de la jerarquía social. Los gobernantes, los nobles y los funcionarios empezaron a exprimir la riqueza derivada del trabajo y los productos elaborados por el campesinado, cuyos integrantes conseguían de la actividad agrícola y ganadera la energía y el alimento que necesitaban. Los estados utilizaban estos nuevos flujos de mano de obra, bienes y energía para pagar a sus ejércitos, mantener los sistemas burocráticos, sufragar sus palacios y adquirir artículos capaces de aumentar su poder y su riqueza.

Concebir estos procesos en términos ecológicos nos recuerda que, en realidad, la riqueza no consiste nunca en una simple acumulación de objetos, sino en el control de los flujos de energía que producen, trasladan, extraen y transforman esas cosas. La riqueza es una especie de luz solar condensada, del mismo modo que la materia es en realidad energía solidificada. La movilización de

esta energía concentrada, extraída de la masa de una población, junto con la utilización de los flujos de recursos que la hacían posible, se convirtió en la tarea fundamental de los gobernantes y sus gobiernos, en una labor que, en último término, acabaría moldeando todos los aspectos de la evolución y la historia de las civilizaciones agrarias.

De hecho, en el caso de los estados tradicionales, el desempeño de sus funciones dependía mucho más de este tipo de movilización de la energía que en el de los estados modernos. Los gobernantes que ejercían el poder mediante este antiguo sistema no necesitaban preocuparse demasiado de la educación, la salud o la vida cotidiana de la mayoría de sus súbditos, pues por regla general, los campesinos conseguían atender sus propias necesidades. Muchos campesinos continuaron viviendo en aldeas independientes, lejos del alcance de los estados y los imperios, así que allí donde las estructuras estatales gobernaron a labriegos y criadores de animales, su principal empeño consistió en extraer de ellos la mayor cantidad posible de recursos. Y con el paso del tiempo, los gobernantes, los funcionarios y los nobles acabarían por realizar esas tareas con creciente habilidad. Si necesitaban más recursos para construir palacios, tender calzadas, reclutar nuevas legiones de soldados o costear sus artículos de lujo, pocos de esos gobernantes tradicionales optaban por la moderna estrategia de invertir en innovaciones susceptibles de incrementar la productividad. Eran tecnológicamente conservadores porque los cambios eran tan lentos que las novedades rara vez generaban beneficios dignos de tal nombre (al menos en el plazo de una generación), y porque muy a menudo acababan por alterar los flujos de riqueza existentes hasta entonces. Los gobernantes podían invertir en la adquisición de un nuevo tipo de armamento o en la construcción de carreteras, pero para la mayoría de los dirigentes de la época el principal reto consistía en incrementar los recursos disponibles valiéndose de las tecnologías ya conocidas y de las formas de movilización tradicionales.

Para aumentar su riqueza y su poder, los gobernantes tradicionales disponían de tres opciones. Los más previsores animaban a los campesinos a sembrar en tierras no cultivadas e instaban a los mercaderes a partir en busca de nuevas materias primas. Sin embargo, muchos de esos dirigentes trataron de obtener ganancias más rápidas mediante otras dos estrategias, no solo más arriesgadas sino también más coercitivas. Por un lado, podían presionar con mayor intensidad a sus propias poblaciones, aun a riesgo de provocar un levantamiento popular o una crisis económica. Por otro, podían apostar fuerte y tomar la decisión de apoderarse de las riquezas de los estados vecinos, lo que les obligaba a mandar a sus ejércitos a conquistarlos. Esto resultaba muy peligroso, pero muchas veces arrojaba buenos dividendos, lo que no solo explica que la mayoría de las élites tradicionales se mostraran belicosas, sino que nos permite también comprender por qué los gobernantes acostumbraban a posar revestidos de una coraza y empuñando las armas cuando decidían encargar estatuas honoríficas. A fin de cuentas, esos gobernantes vivían en un mundo en el que era preciso esgrimir la amenaza de un acto coercitivo para movilizar los recursos, en una época en la que todos admiraban la capacidad de recurrir a la violencia y de someter voluntades con su uso. Cuando alguien se ceñía la corona, apoderarse de los recursos de las regiones vecinas era una de las formas más relevantes de fomentar el crecimiento de la economía. Y si el monarca tenía éxito (pensemos, por ejemplo, en Alejandro Magno), era muy probable que se le elogiase, con independencia de las desgracias que hubiera provocado.

El papel crucial de la movilización se pone de manifiesto desde el principio, y aparece claramente identificado en los tratados que muchos de estos dirigentes tradicionales elaboraron sobre el arte de la política. Uno de los ejemplos más ilustrativos y detallados de este tipo de textos es un manual indio dedicado a las técnicas de gobernación, el *Artha-shastra*. Probablemente se redactó hace poco menos de dos mil años, pero reunía la experiencia acumulada de

otros muchos textos anteriores. Los primeros estados poderosos surgieron en el norte del subcontinente indio hace nada menos que cuatro mil doscientos años, a orillas del río Indo. Sin embargo, cerca de cuatrocientos años después, la llamada civilización del Indo se desmoronaba. Ochocientos años más tarde, comienzan a aparecer nuevos estados, entonces también junto al Ganges porque las tecnologías asociadas con la Edad de Hierro, al permitir la apertura de claros en los bosques, consiguieron que la agricultura se extendiera y provocaron un notable incremento de la población. En torno al año 500 a. C. surgen unas ciudades y unos estados tan poderosos que en algunos casos lograron conquistar a otras ciudades-estado de menor tamaño. Menos de dos siglos después irrumpe en la historia el vasto reino de Magadha, cuya capital, Pataliputra, se encontraba cerca de la actual Patna. Es posible que en su época de máximo apogeo Pataliputra contara con un millón de habitantes, lo que significa que su tamaño era equivalente al de la Roma imperial. La dinastía Maurya acabaría adueñándose de Magadha en torno al año 320 a. C., tras el fracaso de Alejandro Magno en el 327 a. C. en su intento de invadir el norte de la India. A menudo se ha afirmado que Kautilia, el autor del *Artha-shastra*, había desempeñado el cargo de primer ministro en la corte del emperador Chandragupta (que ocupó el trono entre los años 320 y 298 a. C.), iniciador de la dinastía Maurya, pero lo más probable es que el *Artha-shastra* se escribiera varios siglos más tarde.

Como suele suceder con los tratados políticos, el *Artha-shastra* empieza afirmando que la peor situación en que puede encontrarse cualquier persona consiste en hallarse sin estado, o lo que es lo mismo, sin gobernante. Un mundo en el que nadie pueda castigar a los malhechores «engendra la ley del más fuerte: el pez grande se come al chico porque en ausencia del administrador de sanciones el hombre débil es devorado por el fuerte, mientras que, protegido por él, logra prevalecer».[6] Por supuesto, se trata de un argumento muy oportuno para los gobernantes, pero también es cierto que capta

una verdad de orden más general: en la mayoría de los casos, incluso a los campesinos les resultaba ventajoso vivir en un estado bien ordenado.

Así resume el *Artha-shastra* las principales obligaciones de los gobernantes:

> Junto con el comercio, la agricultura y la cría de animales son las actividades que integran la economía. Esta resulta beneficiosa porque proporciona grano, ganado, dinero, productos forestales y mano de obra. Por este medio, [el gobernante] somete a su poder tanto al círculo íntimo de quienes le rodean como a la esfera externa de sus enemigos, valiéndose para ello de la tesorería y el ejército. Lo que permite que cuajen los empeños y genera seguridad [...] es el castigo [*danda*, o cetro del monarca]; y su administración constituye la gobernación. El propósito de esta es la adquisición de cuanto no haya sido adquirido, la salvaguarda de lo adquirido, el incremento de lo salvaguardado y la distribución de lo incrementado entre todos aquellos dignos de recibirlo. De esto depende el buen funcionamiento del mundo. Por consiguiente, el castigo es el fundamento de los tres sistemas de conocimiento.[7]

Como es obvio, todo esto guarda relación con la movilización, es decir, con los mecanismos de bombeo que elevan los flujos de energía, trabajo y riqueza desde el estrato formado por los campesinos, los obreros y los artesanos hasta las capas de los magnates que gobiernan la sociedad con el objetivo de preservar la estabilidad del estado. Buena parte del *Artha-shastra* está consagrada a exponer las directrices de una correcta administración basada en la recaudación de impuestos, la elección de los funcionarios, la creación y el equipamiento de los ejércitos y las prisiones, y el establecimiento de las bases necesarias para que los campesinos puedan producir la cantidad de riqueza que requiere la prosperidad social.

La buena información resultaba vital para garantizar ese tipo de movilización. De hecho, toda movilización fructífera implicaba disponer de un volumen de información superior al de los sujetos pasivos destinados a desempeñar el papel de donantes de recursos.

Otra gran parte del *Artha-shastra* se dedica a explicar cómo crear redes de espionaje, llevar un registro de las acciones judiciales y tener constancia de los recursos y activos del gobierno. Los censos eran vitales. El encargado principal de la recaudación de impuestos debía consignar el número total de aldeas del estado y clasificarlas en función de su riqueza y de la cantidad de grano, animales, dinero, recursos forestales y mano de obra que ofrecían al gobernante, sin olvidar, claro está, el número de soldados que podían salir de las familias que las integraban. El manual aconseja a los gestores de las ciudades que «averigüen el número de hombres y mujeres que forman los distintos [grupos de hogares] y que especifiquen la casta a la que pertenecen, así como su linaje, sus apellidos y sus ocupaciones, además del volumen de sus ingresos y gastos».[8] El cometido de los recaudadores de impuestos locales consistía en levantar acta documental del número de «granjeros, vaqueros, comerciantes, artesanos, obreros y esclavos» de sus respectivas jurisdicciones. También debía elaborar una lista con la identidad de los individuos integrantes de otros grupos de menor tamaño, de entre los que destacan los magos, los gerentes de burdeles, los dueños de tabernas, los soldados, los médicos y los funcionarios. Otros agentes de la autoridad debían certificar registralmente (clasificándolos por edad, color, estado de salud y origen) las características de los caballos, los elefantes y otros importantes recursos de los gobernantes.[9]

Al igual que los seres vivos, los estados son sistemas adaptativos complejos, de modo que comparten muchas de sus características con los organismos vivientes: muchos autores han señalado las semejanzas que los equiparan. En la introducción del *Leviatán*, Thomas Hobbes describe el estado como una especie de enorme monstruo o leviatán:

> [...] que no es sino un hombre artificial, aunque de mayor estatura y robustez que el natural [...] y en el cual la soberanía es un alma artificial [...]; los magistrados y otros funcionarios de la judicatura y del poder ejecutivo [son sus] nexos artificiales; la recompensa y el castigo [representan los nervios];

> [...] la riqueza y la abundancia de todos los miembros particulares constituyen su potencia; la *salus populi* (la salvación del pueblo) está en sus negocios; los consejeros [...] son la memoria; la equidad y las leyes, una razón y una voluntad artificiales; la concordia es la salud; la sedición, la enfermedad; la guerra civil, la muerte.*

Las principales características de los estados muestran claros paralelismos con los seres vivos. Como ya vimos que ocurría con las células de los organismos, los estados cuentan con unas fronteras semipermeables que crean una zona interna protegida del exterior. Los flujos que franquean en uno y otro sentido esa frontera son vitales para la supervivencia del estado, lo que explica que se las vigile con esmero. Los estados disponen también de un «metabolismo» que no solo moviliza los flujos de energía y recursos, sino que los distribuye por el cuerpo social con el fin de mantener activas las funciones del estado —cosa que logra brindando apoyo a las élites (o a los «ilustres», por emplear la expresión que aparece en el *Artha-shastra*), a los ejércitos y a las estructuras burocráticas que lo defienden y gestionan—. Otra semejanza entre los estados y los organismos vivos es el hecho de que la fotosíntesis sea la fuente última que les procura el grueso de los flujos de energía que utilizan, ya que es ella la que permite que los campesinos capten la energía solar. Tal como sucede a los organismos vivos, también los estados deben manejar con precaución los flujos de energía. Si son demasiado pequeños, los estados acaban muriéndose de hambre; si son demasiado grandes, los súbditos se sublevan o perecen de inanición, con lo que los flujos de energía y recursos quedan agostados. Si los seres vivos mantienen una serie de gradientes electroquímicos que orientan los flujos de energía, los estados preservan sus gradientes de persuasión y de coerción. Se sirven de las leyes, la educación y la religión para persuadir a sus súbditos de que su poder es justo. Sin embargo, también preservan la operatividad de los ejércitos y de un conjunto de grupos coercitivos bien disciplinados capaces de forzar la obediencia en caso de que la persuasión fracase. Esto es lo que lleva al *Artha-shastra* a afirmar

que el castigo (*danda*) es el fundamento del estado. En todas las civilizaciones agrarias, la coerción fue uno de los elementos básicos que permitieron materializar la movilización de recursos, lo que contribuye a explicar a un tiempo la importancia de la guerra y la omnipresente aplicación de castigos físicos, tanto en el ámbito social como en el seno de los hogares y las familias.

Como también sucede con los seres vivos, los estados se ocupan de preservar la información relacionada con sus recursos y con la situación de sus enemigos, pues solo de este modo logran la adaptación permanente que les exige la inherente inestabilidad del medio. Para mantenerse alerta frente a los peligros y seguir la evolución de los flujos de riqueza es preciso contar con algún método capaz de registrar la información; una necesidad que comparten el agente judicial, el espía y el funcionario del censo. Esto explica que todos los estados hayan desarrollado algún tipo de escritura, como se advierte incluso en el caso del imperio inca sudamericano, cuyos «amanuenses» utilizaban cuerdas anudadas, o quipus, para consignar los datos. La escritura evolucionó en todas partes hasta convertirse en el método por excelencia con el que registrar cualquier clase de información que resultara útil desde el punto de vista político. Las normas de los estados actúan exactamente igual que el genoma de las células. En los estados, las normativas pueden consultarse en los libros de leyes, encontrarse en las manifestaciones de los gobernantes y los funcionarios locales, leerse en los tratados jurídicos (como el *Artha-shastra)*, perpetuarse labradas en columnas de piedra, atesorarse en el conocimiento colectivo de dirigentes y funcionarios o incluirse como anexo práctico en las tradiciones religiosas.

Si consideramos que los estados están animados y constituyen una suerte de género o tipo de organismo político, estaremos también en condiciones de defender que, con el tiempo, las entidades estatales de corte tradicional evolucionaron, a medida que los gobernantes y los funcionarios fueran asimilando nuevos métodos de gobernación y haciéndose con el control de un conjunto

de tecnologías políticas, militares y burocráticas inéditas. La verdad es que la evolución histórica que han experimentado los estados y las civilizaciones agrarias en el transcurso de los últimos milenios tiene paralelismos con la historia de la biosfera. Y no solo porque una de las características de los estados sea su capacidad de explotar nichos ecológicos nuevos, o su impulso a desarrollar métodos de gobierno igualmente originales, sino también por la constatación de que han sabido valerse de tecnologías políticas innovadoras. Tengamos también en cuenta que si ese proceso adaptativo provocó en unos casos la desaparición de los estados, o el surgimiento en otros de nuevos géneros estatales, en último término consagró asimismo el crecimiento y la expansión de los que consiguieron aumentar su poder y sus conocimientos.

Los estados agrarios se propagan por el mundo

Como ya sucediera en el caso de la actividad agrícola y ganadera, los estados fueron apareciendo de manera independiente en distintas regiones del planeta. Y no es de extrañar que surgieran allí donde el cultivo de la tierra y la cría de animales llevaran siglos o milenios prosperando y fueran prácticas lo suficientemente desarrolladas como para mantener a grandes masas demográficas, generar vastos excedentes, crear inmensas redes de comercio e intercambio y levantar pueblos y ciudades. Sin embargo, no en todas las regiones agrícolas aparecieron estados, y en consecuencia tampoco se desarrollaron los elementos y mecanismos que acompañan a cualquier forma de gobierno estatal. En algunas partes del globo, como en Papúa Nueva Guinea o a orillas del río Misisipí, la vida campesina hizo brotar del suelo extensas aldeas y formas modestas de poder, pero su capacidad productiva no fue lo suficientemente intensa como para satisfacer las necesidades de urbes o estados de gran tamaño.

Como en el caso de la actividad agrícola y ganadera, casi podemos estudiar la difusión de las civilizaciones agrarias por las diferentes zonas del mundo como si analizáramos la propagación de una enfermedad infecciosa.

Hace cinco mil años, solo podían encontrarse estados en la región meridional de Mesopotamia y a orillas del Nilo, pero ya entonces se hallaban inmersos en un proceso de diversificación. Los cimientos de los primeros estados mesopotámicos se correspondían con ciudades que, según parece, se encontraban constantemente en guerra. En el curso del Nilo, en cambio, los estados primigenios adquirieron un mayor tamaño y las ciudades no tuvieron tanto peso. En los dos mil años siguientes, el crecimiento de la población y la evolución de los sistemas políticos trajo consigo un aumento paralelo del poder de los estados afincados en el sur de Mesopotamia, que eran ya capaces de controlar zonas más extensas. Hace unos cuatro mil años había estados al sur de Egipto, repartidos a lo largo del valle de Nilo, y en Sudán. Más al este los detectamos en el valle del Indo, en las regiones septentrionales del subcontinente indio y en el Asia central, y en China advertimos su presencia en el norte del país, a orillas del río Amarillo o Huang He. Un milenio después, hacia el año 1000 a. C., habían surgido ya estados en buena parte de la cuenca oriental mediterránea; en el sur de China, sobre todo a orillas del río Yangtsé; y en algunos territorios del Sudeste Asiático. En Europa y África occidental también surgirían diversos cacicazgos muy poderosos, lo que hizo que no tardaran en transformarse en sistemas estatales plenamente desarrollados. Hace dos mil años, existían también estados y civilizaciones agrarias en la región americana, en particular en Mesoamérica y los Andes, y lo más destacable es que los mecanismos metabólicos elementales que regían su funcionamiento eran los mismos que empleaban los estados de la zona de Afro-Eurasia.

Los estados y los imperios empezaron a disponer de un poder y una riqueza cada vez mayores. Su influencia también se estaba dejando sentir en regiones más amplias, lo que les permitía controlar

un volumen de población crecientemente mayor y diverso, gracias a la evolución de las tecnologías de gobernación de las que se servían. El politólogo estonio Rein Taagepera ha intentado calcular el crecimiento de la superficie terrestre sometida al poder de los estados. Según sus estimaciones, en el 3000 a. C. los primeros estados cubrían una diminuta zona del planeta, tal vez limitada a la décima parte de un megámetro. (Un megámetro equivale a un millón de metros cuadrados, lo que representa el tamaño aproximado del moderno estado egipcio.) Entre los años 2000 y 1000 a. C., tal vez la extensión conjunta de las áreas ocupadas por los estados aumentara a un megámetro o a un megámetro y medio, lo que seguía suponiendo una cantidad irrisoria, ya que apenas suponía el 1 % del terreno que en la actualidad cubren los estados. En su mayor parte, el mundo continuaba tachonado de aldeas de agricultores y ganaderos independientes y poblado por grupos de cazadores y recolectores.

El milenio que se inicia hace cuatro mil años y termina hace tres mil (es decir, entre los años 2000 y 1000 a. C.) nos recuerda que los estados no solo crecen, sino que también se desmoronan. En el valle del Indo, por ejemplo, en lo que hoy es Pakistán, se derrumbó un sistema estatal entero, sin dejar más rastro que un abundante conjunto de restos arqueológicos y de inscripciones muy seductoras (que sin embargo aún no se han podido descifrar). En cambio, una vez superado el año 1000 a. C., volvió a recuperarse el impulso político y empezaron a surgir nuevos estados no solo en regiones aún sin explotar, sino en otras donde convivieron con viejos sistemas estatales que continuaban floreciendo y expandiéndose. De hecho, de todos los sistemas gubernativos de la época, el que más méritos acredita al título de primer megaimperio es probablemente el aqueménida, fundado hacia el año 560 a. C. sobre los restos del reino asirio, en la Mesopotamia septentrional, por el emperador persa Ciro. En el cénit de su poder, el imperio aqueménida debió de controlar unos seis megámetros de terreno. Dos siglos más tarde, se estima que el imperio Maurya del norte de la India alcanzó a superar

los tres megámetros, mientras que, en China, la extensión del imperio Han consiguió igualar la del aqueménida. Hace dos mil años, mientras florecían los imperios romano y Han, aparecían también los primeros sistemas estatales en Mesoamérica y los Andes, aunque tanto sus dimensiones como su población fuesen menores a los de los megaimperios de la zona de Afro-Eurasia. Taagepera calcula que los sistemas estatales de hace dos mil años controlaban aproximadamente dieciséis megámetros de terreno, el 13 % de la superficie total del planeta.

La expansión de los estados y las civilizaciones contribuyó a estimular el surgimiento de nuevas formas de aprendizaje colectivo, ya que gracias a ellos se propagaron por vastas regiones del mundo las tecnologías, los productos básicos, las ideas, las religiones y las filosofías. El impulso que desencadenó la difusión de las poblaciones, los sistemas comerciales y las estructuras estatales no fue solo consecuencia del incremento de los flujos de alimentos y energía que generaba la actividad agrícola y ganadera, sino también de la innovación. El hecho de que hubiera más personas y de que estas vivieran en una gran diversidad de entornos hizo que la información y las innovaciones se acumularan a mayor velocidad que nunca. En este sentido, uno de los factores más importantes fueron las tecnologías, ya que estas aceleraron el intercambio, como demuestran el efecto de las nuevas formas de moneda y la mejora de las técnicas de navegación o las redes viarias. Todos los imperios de Afro-Eurasia fueron grandes constructores de calzadas. A fin de cuentas, los caminos eran las arterias de los imperios. Los gobernantes trazaban rutas para que sus ejércitos y sus mercaderes pudieran desplazarse con mayor rapidez y llegar a regiones más remotas, pero también con el objetivo de crear sistemas de correo y conocer así cuanto antes si se estaba gestando una revuelta o algún enemigo tramaba planes amenazadores. Cuenta Herodoto que el emperador aqueménida Darío I ordenó construir los 2.700 kilómetros del Camino Real Persa, que comunicaba las ciudades de Susa y

Sardes, cerca de la actual Éfeso, y gracias a ella y a la utilización de caballos de refresco, los mensajeros cubrían en siete días una distancia que antes a pie requería noventa.

La escritura permitió a los gobernantes almacenar información importante sobre sus imperios y sus súbditos. Las nuevas tecnologías militares, como el perfeccionamiento de los arneses para los caballos, el uso de monturas para los camellos, la invención de catapultas más potentes o de carros más rápidos, cambiaron la forma de hacer la guerra, y por otro lado, la mejora de las comunicaciones, tanto terrestres como marítimas, transformó el comercio y facilitó el transporte de los productos de las granjas. En tiempos de la antigua Sumeria, las nuevas técnicas metalúrgicas se extendieron por toda la región de Afro-Eurasia. La primera gran revolución fue el descubrimiento del bronce, una aleación de cobre y estaño. Hace unos tres mil años, los hornos adquirieron la eficiencia necesaria para fundir el hierro, que era más resistente y barato que el bronce, porque era más abundante, y la explotación del mineral de hierro se reveló más sencilla que la de las menas de estaño o cobre. A partir del año 1000 a. C., en plena Edad de Hierro, empezaron a utilizarse diferentes metales en la fabricación de armas, aperos de labranza, arneses, carretas y carruajes, y de hecho llegaron a emplearse incluso en la elaboración de objetos domésticos corrientes como las ollas y las sartenes.

El aprendizaje colectivo, que fue dando forma al pensamiento educacional, filosófico y científico, también contribuyó a estructurar las refinadas teologías de las principales religiones de estado, que incluirían todas ellas alguna historia de los orígenes en sus respectivas cosmovisiones. La mayoría de estados intentaron influir en las ideas religiosas de sus súbditos, así que construyeron templos y asumieron la manutención de los sacerdotes oficialmente reconocidos. En muchos casos persiguieron además a todos los chamanes y figuras religiosas que preservaran creencias y prácticas distintas al credo oficial. Los primeros estados rendían culto a una serie de deidades locales, pero a medida que fueron ampliando su

zona de implantación, el poder y el alcance de sus dioses también pareció ampliarse. En los imperios de mayores dimensiones surgen diferentes divinidades máximas, como Ahura Mazda, dios supremo del imperio aqueménida y de la religión de Zoroastro. Los adoradores de estos dioses las consideraban entidades dotadas de poder universal, y del mismo modo, los imperios que les rendían culto afirmaban gobernar sobre el mundo conocido. Todas las grandes confesiones globales contaban con dioses sobrehumanos: el judaísmo, el cristianismo, el islam, las tradiciones espirituales de Grecia y Roma, el hinduismo, el budismo, el confucianismo, o los imperios americanos. Por otro lado, en la mayoría de los casos los gobernantes y los jefes de las tradiciones religiosas institucionalizadas decidieron trabajar en estrecha colaboración, pues comprendieron que las creencias religiosas podían influir de forma decisiva en la gente, lo que a su vez permitía los dos sistemas asociados, el político y el religioso, obtuvieran un sólido respaldo.

Los gobernantes más hábiles desarrollaron diversas fórmulas para aumentar sus riquezas. Por un lado, se esforzaron en proteger a los campesinos y en impedir su sobreexplotación, porque sabían que la mayor parte de su fortuna procedía de las aldeas de agricultores y ganaderos. Si por un lado resultaba peligroso oprimir en exceso a los labriegos y criadores de ganado, por otro parecía sensato protegerlos de los ejércitos enemigos y de los terratenientes proclives a la depredación y brindarles ayuda mediante la distribución del grano almacenado en los silos estatales en caso de que las cosechas se agostaran. Como señalaba el *Artha-shastra*, los campesinos constituían la base de la economía de los estados, así que los gobernantes sabios procuraban fomentar la prosperidad de su campesinado. Los dirigentes hábiles también estimularon el comercio internacional para obtener productos estratégicos raros o de gran valor, como por ejemplo joyas o tejidos de seda para los ricos, estaño para producir bronce e incluso grano para garantizar el abastecimiento de las ciudades. Otros muchos traficaban también con personas, pues la captura y venta de esclavos susceptibles de

trabajar como mano de obra, ocuparse de labores serviles o luchar en los ejércitos prosperó de manera muy notable en las estepas y en los inmensos mercados de esclavos del Mediterráneo oriental y el centro de Asia. Los gobernantes que más se beneficiaban del comercio invertían en mercados y caravasares, protegían a los mercaderes, y construían caminos, vías navegables y puertos a fin de poder transportar las mercancías a mayor velocidad y distancia.

Con la expansión de los estados, crecieron también las redes de intercambio. Hace unos cuatro mil años, las ciudades mesopotámicas ya comerciaban con la India, Egipto y el Asia central, y al mismo tiempo otras regiones del Asia central establecían lazos mercantiles con China. Hace dos mil años, esas redes empezaron a transportar grandes cantidades de artículos, como sedas, monedas, objetos de vidrio y especias. Para lograrlo se cruzaban directamente muchas de las regiones de Afro-Eurasia, bien por las vías terrestres que conocemos con el nombre de Rutas de la Seda, bien navegando por el océano Índico. Estas redes de intercambio internacionales también servirían de vector para toda una serie de realidades indeseadas, como por ejemplo las enfermedades, entre las que se cuentan la viruela y la peste bubónica. Este tipo de dolencias, como las surgidas en la época del emperador bizantino Justiniano I, hace unos 1.500 años, podrían ser la causa de la ralentización del crecimiento demográfico experimentada entre el inicio de la era cristiana y el año mil en las regiones más densamente pobladas de Afro-Eurasia.

Hace dos mil años, existían grandes imperios en toda la región formada por África, Europa y Asia. De entre ellos descuellan el romano, el sasánida, el kushán, el Maurya y el Han. En los territorios intermedios existieron también otros muchos estados menores semiindependientes. En el transcurso del siguiente milenio, es decir, entre el comienzo del cómputo cristiano y el año mil, varios de esos vastos imperios se derrumbaron, incluidos los mayores de todos, el romano y el Han. Tanto la enfermedad como el desplome imperial ralentizaron el crecimiento de la población durante casi un milenio.

Sin embargo, hace unos mil años empezaron a apreciarse nuevos signos de crecimiento. Un conjunto de regiones del sur de China, el norte de Europa y África que hasta entonces estaban casi despobladas, asistió a la expansión de sus aldeas, pueblos, ciudades y redes comerciales. En este sentido, lo más asombroso fue quizá el surgimiento de una serie de sistemas políticos nuevos asociados con la aparición de un nuevo ámbito religioso (el islam), cuya andadura arranca en el siglo VIII d. C.

Cuatrocientos años después, a principios del XIII d. C., unos pastores nómadas encabezados por Gengis Kan fundaron el imperio mongol. Pese a durar menos de un siglo, fue el mayor imperio jamás visto hasta entonces y el primero en extenderse por toda la región de Afro-Eurasia, desde Corea hasta la Europa oriental. Hace cerca de dos mil años aparecieron en las Américas (concretamente en Mesoamérica y los Andes) los primeros sistemas estatales propiamente dichos. Muchos de esos estados americanos, como el maya, tuvieron su base en una única ciudad, tal como tres mil años antes había sucedido con las ciudades-estado sumerias. En tiempos del imperio mongol también existieron sistemas imperiales en las Américas, y en este caso sus gobernantes consiguieron controlar un importante número de ciudades y amplios territorios. Entre esos estados se cuentan los predecesores de los imperios azteca e inca.

¿QUÉ RELEVANCIA TUVO EL CAMBIO EXPERIMENTADO EN LA ERA AGRARIA DE LA HISTORIA HUMANA?

Este período es el primero del que disponemos de una cantidad de información suficiente para intentar valorar algunos de los radicales cambios vividos a lo largo de este tramo histórico. Podemos tratar de ponderar tanto el uso que las sociedades humanas hicieron de la energía como los vínculos que vinculan esa energía con la creciente complejidad de nuestra historia (equivalentes a los que vimos actuar en la respectiva evolución de las estrellas y la biosfera).

En el apéndice se ofrecen algunas cifras que permiten aquilatar el papel que ha desempeñado la energía en la historia de la humanidad y el impacto que ese rol ha ejercido en la vida de las personas. El carácter de esas cifras es provisional, por supuesto, pero todas ellas se fundamentan en las estimaciones más pormenorizadas disponibles acerca de los cambios registrados a gran escala en la historia del género humano. Y el relato que de ellas surge es, además de trascendental, muy útil, pues puede ayudarnos a entender, siquiera a grandes rasgos, el perfil general que presenta la historia de nuestra especie.

En el capítulo anterior vimos que, si bien de forma muy lenta, a lo largo del Paleolítico la población humana creció, posiblemente al ritmo de un cuarto de millón de individuos por milenio en los últimos veinte mil años de la más reciente era glacial. Las cifras de la columna B del apéndice muestran la marcada aceleración que experimenta el crecimiento demográfico tras la introducción de la agricultura. Entre diez mil y cinco mil años atrás, las poblaciones humanas se cuadruplicaron, y después, en el período comprendido entre –5000 y –2000, volvieron a aumentar, y en esta ocasión se decuplicaron. Por consiguiente, en el transcurso del período que va de –10000 a –2000, las poblaciones humanas se multiplicaron por cuarenta, a razón de veinticinco millones de personas por milenio, o lo que es lo mismo, a una velocidad cien veces superior a la registrada por término medio en el paleolítico superior.

Lo que hizo posible ese veloz crecimiento demográfico fue el enorme incremento del consumo de energía de nuestra especie (columna C). Hace dos mil años, los seres humanos utilizaban ya una cantidad de energía setenta veces mayor a la que usaban al final de la última era glacial. Esta colosal progresión de la opulencia energética, derivada de la actividad agrícola y ganadera, no solo sentó las bases del aumento de la población, sino que también sirvió para atender al pago de los diversos gravámenes que la entropía impone a la complejidad, y en última instancia contribuye a explicar

la fortuna acumulada por los ricos y los poderosos. Aun así, existen pocos signos de que mejorara la existencia de la mayoría de los seres humanos.

El grueso de esta abundancia de energía se empleó en el crecimiento demográfico, pero no todo ese excedente se dedicó a tal fin, pues, como muestra la columna D, hace cinco mil años empieza a percibirse un ligero aumento en el volumen de energía consumida por cada individuo. No podemos medir con precisión a qué fines se destinó esa energía extra, pero los datos recopilados hasta la fecha respecto a la evolución de las sociedades agrarias permite aventurar los usos más relevantes a que se consagró. En primer lugar, favoreció el incremento de la complejidad. La columna F del apéndice estadístico ofrece, de forma muy aproximada, los valores de ese aumento de la complejidad, establecidos tomando como referencia el hecho de que el tamaño de las grandes ciudades es un indicador de la capacidad de los seres humanos para construir, mantener y sufragar la creación de estructuras sociales tecnológicas complejas. A fin de cuentas, las ciudades, como el conjunto de las civilizaciones, se apoyan sobre todo en la organización y la realización de inmensos gastos estructurales como carreteras, calzadas, canales de riego, palacios, templos, funcionarios, fuerzas de orden público, mercados y ejércitos. Podemos considerar que estos gastos constituyen una parte de las cargas fiscales que la entropía cobra por todo aumento de la complejidad. También había que abonar a la entropía una especie de tasa de basuras, esa energía de la que en realidad nadie obtenía beneficios porque en buena medida se despilfarraba en guerras y desastres naturales o epidemiológicos.

Sabemos que otra porción de la energía extra conseguida por medio de la actividad agrícola y ganadera se dedicaba a mejorar la vida de las élites, que en la mayoría de las civilizaciones agrarias representaban aproximadamente el 10 % de la población. Las élites controlaban grandes cantidades de riqueza, y es probable que incluso el lento incremento de la esperanza de vida (columna E) se

limitara a los grupos de individuos poderosos y acaudalados. Cabe concluir por tanto que al menos una parte de la abundancia energética procedente de la agricultura contribuyó a mejorar la existencia de un cierto número de seres humanos. La cuestión es que, una vez atendidos todos estos dispendios adicionales, apenas quedaba nada que se pudiera destinar a elevar el nivel de vida del resto de la población. Por eso todas las pruebas de que disponemos sugieren que la mayor parte de las personas de la era agraria vivieron muy próximas al nivel de subsistencia (por más que tengamos casi la certeza de que algunos individuos no especialmente poderosos también disfrutaron esporádicamente de ciertos lujos). El economista francés Thomas Piketty calcula que hasta el año 1900 en la mayoría de los países europeos el 1 % de la población poseía alrededor del 50 % de la riqueza nacional. A esto añade que el 10 % de la población disponía del 90 % del patrimonio global de los países, con lo que el otro 90 % de la gente debía contentarse con el 10 % de riqueza restante. En realidad no existía una clase media en el sentido actual del término, pues «el 40 % de la franja media de la escala de distribución de riqueza era casi tan pobre como el 50 % estancado en las capas inferiores. La inmensa mayoría de la gente no poseía casi nada, mientras que la parte del león de los activos sociales pertenecía a una minoría».[10]

Si esta distribución de la riqueza fue la que caracterizó a la mayor parte de las civilizaciones agrarias, quedaría corroborada la conclusión general de que la abundancia de energía surgida de la actividad agrícola y ganadera solo mejoró la vida de, a lo sumo, una décima parte de la población humana. Ahora bien, probablemente ese sea el destino de todas las fiebres del oro. La posibilidad de que la riqueza se extendiera a un mayor número de capas de población requería el surgimiento de un nuevo ciclo de abundancia energética, uno todavía más espectacular que el de la plétora de energía producido por el cultivo de la tierra y la cría de animales. En el siguiente capítulo analizaremos los cambios que allanaron el camino

que acabaría permitiéndonos superar el umbral 8, es decir, alcanzar la fase llamada a sentar las bases del mundo actual, asombrosamente rebosante de energía.

Capítulo 10

A LAS PUERTAS DEL MUNDO ACTUAL

> «[...] el descubrimiento de América y el del paso a las Indias Orientales por el cabo de Buena Esperanza son los dos acontecimientos más grandes e importantes que se registran en la historia de la humanidad [...]. Al unir en cierta medida las partes más distantes del mundo, al permitirles aliviar sus necesidades recíprocas, incrementar sus comodidades y estimular sus economías, parece que su tendencia general es beneficiosa. Sin embargo, para los nativos de las Indias Orientales y Occidentales, todos los beneficios comerciales que han derivado de esos acontecimientos se han hundido y perdido en las tremendas desgracias que han ocasionado.»
>
> Adam Smith, *Una investigación sobre la naturaleza y causas de la riqueza de las naciones*

> «Lo que yo vendo, señor, es lo que todo el mundo desea: poder.»
>
> Matthew Boulton, el empresario más importante de cuantos invirtieron en la máquina de vapor de James Watt

Al detallar los umbrales que ha tenido que atravesar la historia de la complejidad creciente, hemos presentado unas cuantas conjeturas fundamentadas relativas a las condiciones Ricitos de Oro que hicieron posible ese avance. Ahora, a medida que nos acercamos al mundo actual, podemos ver con mayor precisión cómo van acumulándose las nuevas condiciones Ricitos de Oro que en último

término allanarán el camino a la sorprendente explosión innovadora destinada a generar el mundo de nuestros días, es decir, el mundo del Antropoceno.

La situación del mundo hace seiscientos años

En torno al año 1400 d. C., las dimensiones de la demografía humana daban fe del enorme crecimiento registrado, pues se había pasado de unos cinco millones de individuos de finales de la última era glacial a una cifra cien veces mayor, situada muy cerca de los quinientos millones de personas. Existían aún grandes regiones, tanto en Australasia como en algunas zonas de África, la Eurasia central, Siberia y las dos Américas, donde las poblaciones eran de pequeño tamaño y la mayoría de la gente vivía de la recolección, la caza, la cría de animales o el pastoreo nómada. Sin embargo, en este período la mayoría de los seres humanos vivían ya inmersos en distintas civilizaciones agrarias y dependían directa o indirectamente de la actividad agrícola y ganadera. De hecho, la mayoría de los seres humanos eran granjeros. En muchas regiones del mundo abundaban los campesinos, lo que reproducía, con este nuevo tipo de pobladores, la situación reinante cinco mil años antes, cuando algunas zonas del planeta se habían revelado repletas de cazadores y recolectores. Incluso los territorios del Pacífico comenzaron a ser ocupados, al irse poniendo en marcha las peligrosas migraciones que permitirían a los marineros polinesios asentarse en muchas de las islas de ese océano. Aotearoa (que es el nombre maorí de Nueva Zelanda), la última gran tierra emergida susceptible de sustentar prácticas agrícolas y ganaderas en el Pacífico, empezó a colonizarse hace unos setecientos años.

A medida que aumentara el número de seres humanos, crecería también la presión relacionada con la búsqueda de nuevas tierras, recursos y fuentes de riqueza. Los cazadores y recolectores siberianos, junto con los pastores de renos de esa misma región,

empezaron a verse sometidos a la creciente presión de los funcionarios fiscales, los tratantes de pieles, los mercaderes y los pastores nómadas, lo que les obligó a capturar animales para vender su piel, arrancar los colmillos a las morsas e incluir los productos del bosque en sus trueques. En Australia, donde no existía ningún estado agrario capaz de ejercer presiones que aumentaran su volumen de recursos, el crecimiento demográfico forzó a la gente a incrementar la producción. En las regiones más fértiles del continente, como las inmediaciones de la actual ciudad de Sídney, la disminución de los territorios tribales se acentuó en proporción directa al incremento de las poblaciones no aborígenes, de modo que las comunidades locales tuvieron que desarrollar un nuevo conjunto de tecnologías especializadas e intensivas. En los últimos siglos, las mujeres han pescado en el puerto de Sídney valiéndose de sedales trenzados con fibras procedentes de la corteza del *kurrajong*, o árbol botella, y de anzuelos labrados con la concha de una especie de molusco conocida con el nombre de «turban», gracias a la cual podían atrapar peces en aguas más profundas. Pescaban de noche, desde unas canoas llamadas *nowie*, hechas también de corteza de árbol, en las que encendían hogueras para mantenerse ellas mismas calientes y proteger del frío a los bebés que amamantaban. Joseph Banks, el naturalista que viajaba a bordo del Endeavour, el barco del primer viaje del capitán Cook, en 1770 vio aparecer la bahía de Botany, al sur de Sídney, repleta de las centelleantes luces de las *nowies*.[1] En algunas regiones de Australia donde había aldeas semipermanentes, los aborígenes se hallaban en las primeras fases de la vida campesina.

En algunas de las islas de mayor tamaño del Pacífico, como Hawái, Tonga y Nueva Zelanda, las actividades agrícolas y ganaderas eran ya lo suficientemente productivas para satisfacer las necesidades de un conjunto de poblaciones y estados de pequeño tamaño. En la América Central y en los Andes, la agricultura era ya una práctica que abarcaba regiones de dimensiones lo bastante importantes para proporcionar sustento a algo más que una serie de

estados grandes, pues se convirtió muy deprisa en la base de los primeros sistemas imperiales americanos. El corazón territorial del imperio azteca, cuya evolución progresó a toda velocidad a lo largo del siglo xv, se encontraba en lo que hoy es México. Su capital, Tenochtitlán, se alzaba en el mismo punto en el que hoy se levanta la Ciudad de México. Los feudos geográficos del imperio inca, coetáneo del azteca, se repartían por las laderas de los Andes, en las regiones que más tarde recibirían el nombre de Ecuador y Perú. La capital inca, Cuzco, estaba situada al sureste de este último país.

Tanto la presión demográfica como la competencia desatada por la movilización de nuevos recursos se dejaron sentir de modo más intenso en Afro-Eurasia: la región más antigua, grande, poblada y diversa de todas las que dividen el mapamundi. En su incesante búsqueda de fuentes de energía y recursos, los gobernantes, los empresarios y los campesinos, siempre ávidamente necesitados de terreno, competían por obtener nuevas tierras de cultivo y formas de riqueza, de entre las que podemos destacar las pieles, las especias y los minerales.[2] En caso necesario, no dudaban en deshacerse de los cazadores y recolectores. Estas presiones obligaron a los campesinos a establecerse en unas tierras que en otras épocas hubieran desdeñado, como las situadas en la parte septentrional de Escandinavia o algunos puntos de Ucrania y Rusia, en la linde misma de las áridas estepas euroasiáticas. La presión tendente a la movilización de recursos contribuyó a incrementar la densidad de las redes de Afro-Eurasia y a diversificarlas, pues aumentó tanto su tamaño como el valor y la variedad de las mercancías y las ideas que los diferentes grupos humanos intercambiaban gracias a las rutas de la seda o las vías marítimas del océano Índico.

En 1400, una compacta masa de personas, ciudades y tierras de cultivo que se extendía ya desde el océano Atlántico hasta el Sudeste Asiático y China, pasando por ambas orillas del Mediterráneo, Persia, algunas de las regiones del Asia Central y la India. A partir del año 1500, el imperio más rico y más poblado del planeta fue el gobernado por la dinastía Ming, en China. Casi un

siglo antes, a principios del XV, el emperador Ming, Yongle, armó una inmensa flota, capitaneada por un eunuco musulmán llamado Zheng He, y la mandó a recorrer el océano Índico, con escalas en la India, Persia y los ricos puertos del África oriental. Las naves de Zheng He se cuentan entre las mayores y más sofisticadas jamás construidas, y los numerosos viajes que realizó constituyeron además un interesante anticipo del proceso de globalización que estaba a punto de iniciarse. No obstante, vencido el año 1433, bajo la gobernación del nuevo emperador Hongxi, la dinastía Ming abandonó estas expediciones. China pasaba por un período de gran prosperidad y su economía era autosuficiente, así que las expediciones de Zheng He tenían ya escaso valor comercial. Además, resultaban muy caras. El nuevo emperador y sus asesores decidieron dedicar ese dinero a otros fines más útiles, como por ejemplo asegurar la defensa de las fronteras septentrionales del imperio, sometidas a las cíclicas invasiones de los pastores nómadas.

Los gobernantes que además de disponer de menos recursos se hallaban al frente de poblaciones de menor tamaño tenían aún más razones para intentar obtener riquezas lejos de sus fronteras. En los siglos XV y XVI, el joven principado de Moscú se expandió a un ritmo particularmente acelerado. Sus gobiernos construyeron una línea de fortificaciones defensivas que les permitieron ampliar sus fronteras en varias direcciones: hacia el sur, para aproximarse a los fértiles pero inhóspitos pastos que se abren al norte del mar Negro; hacia el sureste, para acceder a los mercados centroasiáticos de la Ruta de la Seda; y hacia el este, para enlazar con las florecientes canteras y bosques productores de pieles de Siberia. El imperio otomano fue el más poderoso del mundo musulmán. En el siglo XVI, su poder se extendía por el sureste de Europa, Mesopotamia y el norte de África. Tras conquistar en 1517 Egipto, los otomanos pasaron a controlar también la lucrativa y variada serie de intercambios comerciales que unían el océano Índico con el Mediterráneo y Europa. En ese mismo siglo surgió otro imperio musulmán, rival del anterior, en el subcontinente indio: el de los mogoles, fundado por Babur,

descendiente del emperador mongol Gengis Kan. También en África surgieron diversos estados e imperios notablemente poderosos al norte del Sahara, a orillas del Nilo y en el África occidental, sin olvidar los diseminados por sus costas orientales, salpicadas de prósperas ciudades comerciales. Europa se encuentra en el extremo occidental de la masa continental euroasiática, lejos de las fructíferas corrientes comerciales cuyos abundantes productos circulaban por el Mediterráneo y el Índico. Los venecianos lograron explotar esos flujos mercantiles, pero no fue tarea fácil. En el siglo XVI, el imperio más poderoso de Europa fue el Sacro Imperio Romano Germánico, una destartalada amalgama de estados, obispados y principados unidos mediante lazos matrimoniales y actos de conquista que se extendió desde Austria y Alemania hasta los Países Bajos y España.

En el siglo XV, el mundo todavía estaba dividido en una serie de zonas mundiales diferentes entre las que no existían contactos relevantes. Sin embargo, el aumento demográfico y la creciente presión de la movilización asociada con la búsqueda de recursos eran ya un indicio claro de que, antes o después, se superarían las membranas oceánicas que todavía mantenían separadas las distintas regiones de planeta. Lo que no estaba claro era quién podría hacerlo y cuándo, aunque las intensas presiones de movilización existentes en la zona de Afro-Eurasia inducían a pensar que la apertura de una brecha en esas barreras surgiera precisamente en esa región.

En 1492, una expedición liderada por un navegante de origen genovés llamado Cristóbal Colón cruzó el océano que separaba los dos mayores bloques territoriales del globo. Colón logró que los reyes de España respaldaran su corazonada de que el Atlántico ofrecía una ruta mucho más corta entre Europa y los florecientes mercados del este de Asia. En el transcurso de los tres siglos siguientes, también conseguirían perforarse las membranas que separaban la región de Australasia del área del Pacífico, de modo que, por primera vez en la historia de la humanidad, el intercambio

de información, ideas, mercaderías, personas, tecnologías, credos religiosos e incluso enfermedades empezó a producirse a escala planetaria.

El cambio dio lugar a una transformación inmensa. Era la primera vez, desde que las placas tectónicas crearan el supercontinente unitario de Pangea, hace doscientos cincuenta millones de años, que los genes, los seres vivos, la información y las enfermedades podían fluir con cierta libertad en el ámbito de un mismo sistema mundial. El profesor de historia universal Alfred Crosby, que bautizó esta revolución ecológica con el nombre de «intercambio colombino», ha demostrado que la globalización introdujo en la biosfera un conjunto de modificaciones tan importantes como las que hemos constatado en la historia de nuestra especie.[3] En el *Manifiesto comunista*, Marx y Engels afirman que estos cambios fueron justamente los que de repente pusieron en marcha el capitalismo moderno.

> El descubrimiento de América y la circunnavegación de África abrieron nuevos horizontes e imprimieron nuevos impulsos a la pujante burguesía. El mercado de China y de las Indias orientales, la colonización de América, el intercambio con las colonias, el incremento de los medios de cambio y de las mercaderías en general, dieron al comercio, a la navegación y a la industria un empuje nunca antes conocido, provocando con ello el rápido desarrollo del elemento revolucionario que se escondía en el seno de la sociedad feudal en descomposición.[*]

El impacto de la súbita unión de las diferentes zonas del mundo resultó tan notable que, en el plazo de unos pocos siglos, las sociedades humanas traspasaron el octavo umbral de la complejidad creciente. El cambio pudo producirse a semejante velocidad porque el mundo se había globalizado. En el pasado, el aprendizaje colectivo había operado a escala local o regional, lo que explica que los agricultores necesitaran diez mil años para diseminarse por todo el planeta. Pero en un mundo presidido por las redes globales recién creadas, bastaron unos pocos siglos para transformar buena parte de la Tierra, y se trató además de un cambio tan imponente como el más notable de cuantos se hubieran producido en los cuatro mil

millones de años anteriores de historia de la biosfera. De repente, los seres humanos se encontraron conectados e inmersos en una misma esfera global de pensamiento: la noosfera. Con el arranque del siglo XX, la noosfera se convirtió en una fuerza perturbadora capaz de modificar el conjunto de la biosfera.

La creación de un sistema mundial único

Los navegantes europeos fueron los primeros en entrar en contacto con las principales zonas geográficas del mundo, lo cual durante varios siglos otorgó una ventaja colosal a los gobernantes y a los emprendedores europeos, dado que Europa, que anteriormente se había encontrado muy alejada de los grandes ejes de riqueza y poder, empezó a controlar de pronto las puertas de acceso a los mayores flujos de riqueza e información que había conocido hasta entonces la historia de la humanidad.

La causa de que los navegantes europeos penetraran en tromba en las nuevas zonas del mundo reside en el hecho de que no disponían de un acceso fácil a los ricos mercados del sur y el sudeste de Asia. Eso les animó a asumir riesgos para conseguir una parte del pastel, y sobre todo a superar a los mercaderes otomanos, que dominaban el Mediterráneo. Esto explica que a mediados del siglo XV, los gobiernos portugueses comenzaran a enviar sus carabelas (que además de ir provistas de cañones tenían una extraordinaria capacidad de maniobra) a la costa occidental de África con el propósito de sondear las posibilidades de extracción de recursos en esa zona. Este tipo de embarcaciones, dotadas de velas latinas basadas en el modelo de los velámenes islámicos, y de brújulas y cañones construidos a partir de inventos chinos, constituían en sí mismas un claro ejemplo de las sinergias intelectuales que acumuladas en la zona de Afro-Eurasia. Al llegar la década de 1450, los navegantes portugueses ya habían conseguido establecer un rentable comercio marítimo con el imperio de Malí, del que obtenían

el oro, el algodón, el marfil y los esclavos cuyo transporte había requerido en el pasado el uso de caravanas de camellos capaces de cruzar las difíciles rutas terrestres del Sahara.

Estos modestos éxitos estimularon a sus rivales, entre los que destaca el navegante genovés Cristóbal Colón quien convenció a los monarcas españoles Fernando e Isabel de que debían apoyarle en la búsqueda de una ruta más directa hacia Asia. Creía que una posibilidad era atravesar el Atlántico navegando siempre hacia el oeste. Estaba erróneamente persuadido de que la distancia hasta China a través del Atlántico era mucho menor de lo que muchos otros suponían. Fernando e Isabel apostaron por su idea porque sabían que, en caso de que el marino estuviera en lo cierto, los beneficios serían extraordinarios. El 12 de octubre de 1492, los barcos de Colón avistaron una isla que bautizaron como San Salvador, perteneciente hoy al archipiélago de las Bahamas. En los últimos años de su vida, el descubridor seguía convencido de haber llegado a Asia, «las Indias», y por eso llamó «indios» a los pobladores de las regiones en las que desembarcó. Esa fue también la razón de que le desconcertaran tanto su desnudez, su aparente pobreza,[4] y que no vistiesen kimonos ni túnicas de seda. Los nativos que apresó le condujeron hasta Cuba, donde encontró pequeñas cantidades de oro, lo que bastó para que Fernando e Isabel se persuadieran de la conveniencia de financiar nuevos viajes. Con sus idas y venidas, Colón estableció la primera línea de contacto regular entre dos zonas del mundo tan relevantes como las de América y Afro-Eurasia. En 1498, apenas seis años después del primer periplo trasatlántico de Colón, el capitán portugués Vasco de Gama mostró que también podía llegarse al Sudeste Asiático por el extremo meridional de África. El océano Índico no era un inmenso lago cerrado, como muchos habían supuesto.

Muchos (si no la mayoría) de los contactos iniciales entre personas de diferentes zonas del mundo fueron violentos, caóticos y destructivos. Desde luego, el recelo que a menudo inspiran los extraños tuvo en este caso un papel destacado. Sin embargo,

también pesaron en esos desencuentros las muchas diferencias que separaban a los ahí reunidos, pues no solo les distinguían cuestiones como la densidad de la población, las tecnologías disponibles o el modelo de sus respectivas organizaciones sociales y militares, sino también factores como la resistencia a ciertas enfermedades, dado que en esas regiones hasta entonces aisladas los muchos milenios transcurridos habían generado (o dejado de generar) unas respuestas inmunológicas muy dispares. Evidentemente, unos salían ganando y otros perdiendo, pero la cuestión es que, para estos últimos, los resultados podían ser catastróficos. Como ya ocurriera con la primitiva oxigenación de la atmósfera o con la muerte repentina de los dinosaurios, la situación creada a partir del siglo XVI iba a constituir otro ejemplo de lo que el economista austríaco Joseph Schumpeter denominó «destrucción creativa», esto es, el constante reemplazo, frecuentemente violento, de lo viejo por lo nuevo —de acuerdo con un proceso que, a juicio de Schumpeter, se hallaba presente en el corazón mismo del capitalismo moderno—. Muchas sociedades se arruinaron y se perdieron muchas vidas. Pero hubo también creación, porque el inmenso alcance de las primeras redes de intercambio global contribuyó a coordinar el aprendizaje colectivo a escala planetaria, liberando enormes flujos de información, energía, riqueza y poder, todo lo cual transformaría las sociedades humanas del conjunto del planeta.

Dado que sus barcos habían sido los primeros en romper las barreras que mantenían incomunicadas las diferentes regiones del mundo, casi todas las ventajas cayeron del lado de los estados e imperios situados en la vertiente occidental de Afro-Eurasia, marcados por su hambre de recursos. Todos esos sistemas de gobierno comenzaron entonces a explotar esa privilegiada situación, animados por un denuedo implacable que además aplicaron con la eficacia propia de un organismo predador. No habían transcurrido aún cincuenta años desde el primer viaje de Colón cuando los portugueses consagraban ya sus carabelas armadas a la construcción de baluartes bien fortificados para consolidar el imperio

comercial que estaban levantando en el océano Índico. Los mercaderes y marinos afrontaban enormes riesgos, pero los beneficios que podían obtener también eran inmensos. En las dos Américas, los conquistadores españoles, como Hernán Cortés y Francisco Pizarro, lograron controlar las riquísimas civilizaciones de los aztecas y los incas con unos ejércitos exiguos que explotaron las divisiones políticas existentes en ambos imperios. No obstante, también les ayudaron a conseguirlo las devastadoras consecuencias de las enfermedades europeas, como la viruela, que además de acabar con el 80 % de la población de los dos imperios más importantes de América, arruinaron también sus antiguas estructuras sociales y sus tradiciones. Pese al enorme coste que el proceso tuvo para los afectados, los conquistadores habían dado, literalmente, con una mina de oro, de modo que disfrutaron de un raudal riquezas, tanto para sí como para las sociedades de las que provenían.

Sin embargo, los conquistadores españoles encontraron en las Américas algo más que oro y plata. Consiguieron tierras aptas para el cultivo de plantas como la caña de azúcar, cuyo producto despertaba en los europeos un apetito tan inmenso como creciente. Los españoles (entre los que hay que incluir a los propios parientes de Colón) ya habían demostrado que podían producir azúcar a bajo coste en las islas Canarias, donde las plantaciones funcionaban con mano de obra esclavizada. Estos campos de cultivo habían permitido entrever los beneficios que podían obtenerse en las Américas, muchas veces mediante el uso de una violencia brutal.

En Potosí, en la actual Bolivia, los comerciantes españoles encontraron en la década de 1540 una inmensa cantidad de plata. En un primer momento explotaron esa riqueza mediante los tradicionales sistemas de trabajos forzados heredados de la cultura inca, pero los índices de mortandad eran tan altos que los responsables empezaron a servirse de esclavos importados de África. Los convoyes de mulas que partían de Potosí transportaban el metal hasta el puerto mexicano de Acapulco, donde era acuñado y

convertido en pesos de plata, la primera moneda global que conoció el mundo. La enorme cantidad de pesos que cruzó el Atlántico en dirección a Europa contribuyó a reflotar la economía local, pues el gobierno español pudo con él cancelar las deudas que tenía contraídas con sus acreedores holandeses y alemanes. No obstante, los pesos también atravesaron el Pacífico, embarcados en las llamadas «naos de China» que partían hacia la ciudad de Manila, dominada por los españoles. Una vez en las Filipinas, los comerciantes y funcionarios españoles empleaban estas monedas de plata para comprar los objetos de seda, porcelana y otras materias que les ofrecían los mercaderes chinos; artículos que luego revendían, con enormes beneficios, tanto en las Américas como en Europa. Se trataba de una clásica economía de arbitraje. Los comerciantes compraban sus mercancías allí donde las encontraban más baratas y las vendían donde alcanzaban un valor más alto, proceso en el que se generaban unas ganancias descomunales debido a que, en los primeros mercados globales del mundo, la diferencia entre los costes de producción y los precios de venta podía ser enorme. La floreciente situación económica china necesitaba plata y la pagaba muy cara, y como consecuencia de ello en ese país asiático se obtenía por la plata el doble de lo que se podía conseguir en Europa (a lo que hay que añadir que la mano de obra esclava de las Américas permitía mantener unos costes de producción bajísimos). Por el contrario, la seda de alta calidad, un tejido muy habitual en China, era muy rara en Europa, lo que elevaba mucho su precio.

Mientras sus embarcaciones lograran esquivar a los piratas y evitar el naufragio, los comerciantes europeos y quienes les patrocinaban podían obtener unas ganancias inmensas mediante la simple explotación de los acusados gradientes de precio característicos de las primeras redes globales de intercambio. En el siglo XVII, los holandeses y los ingleses darían continuidad a lo que tanto portugueses como españoles habían puesto en marcha.

Comenzaron por apoderarse poco a poco de los fortines portugueses de Asia y prosiguieron después erosionando paulatinamente las colonias españolas y portuguesas del Caribe y América del Norte.

A través de esos gradientes, y en compañía de los flujos de riqueza, viajó también la información, un recurso que no tardó en revelarse tan importante como el capital. A mediados del siglo XV, la invención de Johannes Gutenberg, que acababa de idear una eficiente y novedosa forma de imprimir textos, empezó a magnificar el impacto de los nuevos flujos de información. Entre los años 1450 y 1500 se publicaron cerca de trece millones de libros, mientras que de 1700 a 1750 vieron la luz más de trescientos millones de obras.[5] Los libros dejaron de ser un objeto raro adquirido a precio de lujo —y otro tanto sucedió, por supuesto, con la información que contenían—, de modo que para las personas cultas se convirtieron en una compra habitual y cotidiana. Además, tal como había ocurrido con los beneficios del comercio de arbitraje, que estimuló el comercio europeo, la irrupción de unos nuevos y enormes flujos de información actuó como un potente catalizador de la ciencia y la tecnología occidentales.

Los navegantes europeos encontraron nuevas islas y continentes, contemplaron constelaciones hasta entonces desconocidas y entraron en contacto con pueblos, religiones, estados, plantas y animales que los textos antiguos no mencionaban. La marea de nuevas informaciones provocó en toda Europa una verdadera sacudida en la educación, la ciencia, e incluso la religión. Esto se debió, entre otras cosas, a que Europa era la región por donde debían cruzar necesariamente los nuevos flujos de información y por donde esas corrientes circulaban a mayor velocidad. Esa información obligó a los eruditos europeos a poner en tela de juicio la ciencia de épocas pasadas y a cuestionar incluso la Biblia. Empezaron a tambalearse, por tanto, las historias de los orígenes tradicionalmente aceptadas. En la Inglaterra del siglo XVI, Francis Bacon argumentó que la ciencia y la filosofía no debían continuar apoyándose en los textos antiguos, sino que tenían que tratar de adquirir activamente

un conocimiento nuevo, tal como habían hecho los navegantes europeos: «Muchos son los misterios de la naturaleza que han quedado desvelados y expuestos gracias a las travesías y viajes que hoy son ya moneda corriente, y eso es algo que podría arrojar nueva luz sobre la filosofía».[6] El pensador inglés Joseph Glanvill escribía lo siguiente en 1661: «Hay una *América* de secretos, y un *Perú* de realidades naturales que aguardan a ser descubiertos».[7]

Así lo explica hoy el moderno historiador de las revoluciones científicas David Wootton: «La idea del descubrimiento fue [...] una de las condiciones previas que requirió la invención de la ciencia».[8] Es más recomendable estudiar el mundo mismo que lo que se ha *dicho* acerca de él. Bacon sostenía que solo «obedeciendo a la naturaleza aprenderíamos a conquistarla». Esto sintoniza en gran medida con el ánimo manipulador de la ciencia y la tecnología modernas. En el siglo XVII, muchos estudiosos empezaron a darse cuenta de que estaban asistiendo a una revolución no solo intelectual sino también geográfica y comercial, y que los nuevos conocimientos estaban incrementando el poder de los seres humanos sobre el mundo natural. Uno de los miembros de la Real Sociedad de Londres se refería en 1674 a la nueva situación creada en los siguientes términos: «Y por lo que hace a nuestro trabajo, coincidiremos todos [...] en que lo que estamos haciendo no es encalar las paredes de una casa vieja, sino levantar una de nueva planta».[9] En el siglo XVIII, los pensadores europeos de la Ilustración comprendieron que los nuevos conocimientos tenían un objetivo y un significado, lo que les hizo concebir la idea de que se estaba «progresando». La noción de que los seres humanos deben transformar y «mejorar» el mundo comenzó a moldear la ciencia y a influir en la ética, la economía, la filosofía, el comercio y la política.

El universo del pensamiento experimentó un notable vuelco. David Wootton describe el cambio en los términos más vivos. En la época de Shakespeare, incluso los europeos más cultos daban crédito a la magia y la brujería, y muchos creían en la existencia de los hombres lobos y los unicornios. También pensaban que la Tierra

permanecía estática en el centro del universo, mientras que los cielos giraban en torno a ella; que el avistamiento de un cometa constituía un mal augurio; que la forma de una planta indicaba cuáles eran sus propiedades medicinales, dado que Dios había diseñado las cosas con el propósito de que resultaran interpretables; o que la *Odisea* relataba acontecimientos verídicos.[10] Siglo y medio más tarde, en vida de Voltaire, los europeos de elevado nivel educativo veían el mundo con unos ojos muy distintos. Muchos hacían acopio de instrumentos experimentales o se documentaban sobre su funcionamiento, apasionados por los telescopios, los microscopios y las bombas de aire; consideraban a Newton el mayor científico de todos los tiempos; sabían que la Tierra orbitaba alrededor del sol; no se tomaban en serio ni la magia ni las antiguas leyendas ni la aducida realidad de los unicornios ni (la mayoría de) los milagros. En cambio, creían en el avance del conocimiento y en algo similar al progreso.

La nueva información dotó a los seres humanos de los ladrillos intelectuales necesarios para la adquisición de nuevas clases de conocimientos y el cemento imprescindible para consolidarlos. Con su desarrollo de las leyes de la gravedad, Isaac Newton abrió una puerta por la que pudo acceder a un volumen de información sin precedentes. Quedó en condiciones de comparar, por ejemplo, la oscilación de los péndulos de París con la de los instalados en las Américas y África. Ninguna generación de científicos anterior había tenido ocasión de someter a una batería de pruebas tan exhaustiva sus ideas, ni se había podido contrastar en un conjunto de redes de información tan amplio y tan variado.

> El logro de Newton podría asociarse con el incremento general del conocimiento que el comercio y la exploración ultramarinos habían aportado a los europeos. El valor de generalizar y de llegar a conclusiones universales sobre el mundo natural debe mucho a la inmensa cantidad de información —y de confianza en las propias posibilidades— que el dominio occidental de los océanos proporcionó a pensadores de tierra adentro como Isaac Newton.[11]

La deslumbrante irrupción de todos esos nuevos flujos de recursos y conocimientos tuvo un efecto aún más poderoso: el de estimular aquellas formas de movilización comercial que solemos vincular con el capitalismo, cuyo principal motor adquirió velocidad de crucero debido precisamente a la previa existencia de fuertes gradientes de riqueza e información. En la mayoría de los casos, la fórmula empleada por los gobernantes tradicionales para movilizar recursos había pasado por el triple expediente de esgrimir amenazas de coerción, blandir promesas de protección y recabar el apoyo de las autoridades jurídicas y religiosas. Sin embargo, en todas las civilizaciones los comerciantes habían movilizado también grandes volúmenes de riqueza gracias a sus propios intercambios. Como ya hemos visto, la movilización comercial de bienes y caudales se basaba en la economía de arbitraje, es decir, en comprar barato en una región para vender caro en otra. Si querían salir airosos de sus empeños, los comerciantes necesitaban dinero para invertir e información para saber en qué hacerlo. Debido a los inmensos gradientes de riqueza e información de las primeras redes de intercambio global, los comerciantes y empresarios europeos se vieron ante un conjunto de oportunidades mercantiles tan enorme que su opulencia y su ascendiente político crecieron hasta el punto de poder influir, mediante la concesión de préstamos, en los mismísimos emperadores (como puede apreciarse, por ejemplo, en el caso de Carlos V, el soberano del Sacro Imperio Romano Germánico).

Los dirigentes europeos solían mostrarse más proclives a trabajar con los comerciantes que los gobernantes tradicionales (como los emperadores de la dinastía Ming china), dado que la mayor parte de los estados que dirigían tenían que arreglárselas con unos recursos bastante modestos y a menudo se hallaban enzarzados en una interminable serie de guerras, así que solían andar faltos de efectivo. Además, como es natural, los gobernantes que solicitaban créditos a los comerciantes eran más proclives a respaldar el comercio. De este modo fue creándose una estrecha relación simbiótica entre los

comerciantes y los dirigentes de los estados europeos. Los gobernantes protegían y apoyaban las actividades comerciales, y a cambio podían gravar con impuestos los intercambios, con lo que se beneficiaban de la riqueza comercial. Nacía así la primera y más cruda forma de capitalismo, un sistema que no obstante admirarían todos los economistas europeos, de Adam Smith a Karl Marx.

La emergente asociación entre los gobiernos europeos y los empresarios adoptó diversas formas. El comercio de vodka ruso nos ofrece en este sentido un ejemplo perfectamente adecuado.[12] En Rusia empezó a destilarse alcohol en el siglo XVI y casi de inmediato los funcionarios del gobierno de Iván el Terrible (quien se ganó este apodo por el brutal trato que daba a su propia nobleza) comprendieron que si impedían que los campesinos destilaran en sus hogares (cosa que no resultaba difícil de frenar, porque el proceso requería mucha destreza y una notable cantidad de aparatos), las arcas del estado ingresarían un montón de dinero, ya que el licor se convertiría en uno de los pocos artículos que los campesinos tendrían que comprar a terceras personas. Se trataba además de una sustancia con potentes efectos embriagadores, así que no tardó en convertirse en bebida obligada para todos los campesinos que quisieran celebrar las grandes efemérides religiosas y fiestas familiares, por no mencionar las bodas y los funerales. Sin embargo, distribuir el alcohol a los miles de aldeas dispersas por las inmensidades rusas no era tarea fácil, aunque muy adecuada para los comerciantes. Así pues, el gobierno ruso, de común acuerdo con los vendedores, puso en marcha un negocio de distribución de vodka tan rentable que, en el siglo XIX, su producto contribuía ya a sufragar buena parte del coste del ejército ruso, que por entonces era uno de los mayores del mundo. Tanto los sucesivos gobiernos rusos, como la sociedad del país, tuvieron que pagar un alto impuesto entrópico por el complejo bombeo de ingresos obtenidos con la comercialización del vodka, pues este dio lugar a elevados y muy peligrosos niveles de alcoholismo.

Pese a que el capitalismo generara nuevas formas de desigualdad, los economistas lo admiraban porque también resultaba muy eficaz en la generación de riqueza y en el fomento de las innovaciones. Muchos de los primeros economistas comprendieron a la perfección que la riqueza generada por los capitalistas, que también empleaban en comerciar, derivaba en realidad del control de la luz solar, convenientemente comprimida en artículos concretos, y del manejo de los flujos de energía que recorren la biosfera. A ello se debe que muchos estudiosos de la economía suscribieran la teoría del valor-trabajo, ya que, a fin de cuentas, el trabajo era una forma de energía. No obstante, también comprendieron que una de las cosas que mejor hacía el capitalismo era estimular la innovación y la invención de sistemas de control de la energía. A su vez, esto se debía al hecho de que, a diferencia de los gobernantes tradicionales, los comerciantes rara vez podían recurrir al uso de la fuerza bruta para movilizar la riqueza (aunque no tuvieran el menor reparo en emplearla si se les presentaba la ocasión). En la mayoría de los casos, los comerciantes debían valerse más de la astucia que de la violencia, lo que implicaba buscar con ahínco nuevos elementos de información. Su propia actividad les obligaba a descubrir artículos y mercados todavía no explotados, por no mencionar que también debían comerciar con eficacia y reducir sus costes. Lo más imperioso era la innovación, ya que sin ella no podían superar a sus rivales. No les quedaba más remedio que hallar fórmulas nuevas de movilizar y controlar los flujos de energía y recursos. Esto contribuye a explicar que en los siglos siguientes al primer viaje de Colón a las Américas las sociedades europeas, cada vez más capitalistas, asistieran simultáneamente al crecimiento de su propia abundancia y al incremento de las innovaciones disponibles.

En algunos casos, el de los Países Bajos y Venecia, los comerciantes eran quienes llevaban las riendas del gobierno, de modo que sus dirigentes se tomaban muy en serio la actividad comercial. Los británicos aprendieron mucho de los holandeses, y durante un breve espacio de tiempo, a finales del siglo XVII, llegarían

incluso a obedecer a un rey de esa nacionalidad: Guillermo III. Los gobiernos de Gran Bretaña invirtieron inmensas cantidades de dinero para disponer de una armada capaz de proteger los puestos comerciales avanzados y las colonias que tenía en el Caribe, América del Norte y, andando el tiempo, la India. Y gracias al amparo de esa flota, tanto los gobiernos como los comerciantes británicos lograron enormes beneficios. Se dedicaban, por ejemplo, a vender armas a los gobernantes africanos a cambio de grandes cantidades de esclavos que luego transportaban a las Américas en condiciones espantosas. Con los esclavos se hacían trueques y se conseguía azúcar, tabaco y otros productos de las plantaciones, cuyos precios permanecían en niveles muy bajos porque la mano de obra esclavizada apenas tenía coste. Esto permitía vender el producto de las plantaciones a precios baratos pero con importantes beneficios en los mercados de consumo de Inglaterra y Europa, que se hallaban inmersos en un rápido proceso de expansión. De este modo, los gobiernos británico y holandés empezaron a depender cada vez más de los ingresos derivados del comercio, de entre los que destacaba el de los derechos de aduana. Esto nos ayuda a entender por qué en 1694 se creó el Banco de Inglaterra, cuyo objetivo consistía, entre otras cosas, en ofrecer créditos asequibles a los comerciantes, empresarios y terratenientes británicos. En el siglo XVIII, la posibilidad de conseguir préstamos baratos estimuló la innovación en el ámbito de la agricultura y facilitó tanto la construcción de canales como la creación de un extenso sistema de transportes por carretera. Londres se convirtió así en una de las mayores ciudades del mundo, y el comercio británico experimentó un crecimiento explosivo.

Los nuevos flujos de riqueza e información, añadidos a nuevas formas de conocimiento científico, estimularon la aparición de innovaciones en numerosos ámbitos, como por ejemplo la agricultura, la minería, la construcción naval, la navegación y la apertura de canales. Esto fue muy evidente en la Europa occidental. Después del año 1500, la abundancia y la capacidad de acción

política comenzaron a cambiar rápidamente de manos, con lo que las regiones europea y atlántica, hasta entonces estancadas, se convirtieron en poco tiempo en un nuevo polo de atracción y pasaron a ser el centro de los primeros flujos globales de riqueza, información y poder.

Los combustibles fósiles: una megainnovación

La aparición de un mundo globalizado y de una clase emprendedora cada vez más rica y poderosa, respaldada además por los gobernantes de las diferentes regiones prósperas, estimuló notablemente el comercio y la innovación, sobre todo en la región atlántica. Aun así, como ya hemos visto, algunas novedades ejercen un mayor impacto transformador que otras. Teniendo en cuenta la creciente abundancia en que nadaba Europa, no es extraño que fuera justamente esa zona la que viera brotar con mayor fuerza el dinamismo empresarial, los flujos de información y las megainnovaciones llamadas a alumbrar el mundo moderno —y en contrapartida, parece igualmente lógico que las antiguas regiones centrales que iban del Mediterráneo a China, pasando por Eurasia y los países musulmanes, no asistieran a un desarrollo tan acusado—.

Por regla general, las megainnovaciones más relevantes son aquellas que contribuyen a liberar nuevos flujos de energía, como la fusión o la fotosíntesis. La actividad agrícola y ganadera es una megainnovación porque permite que los campesinos exploten un mayor volumen de flujos de energía mediante el aprovechamiento de los ciclos fotosintéticos recientes. Esos flujos crecientes fueron los que impulsaron los turbulentos cambios de la era agraria. No obstante, los flujos de energía que pueden extraerse mediante el cultivo de la tierra y la cría de animales son limitados, pues la luz solar que puede usarse es solo la que llega al planeta poco antes de su captación. Si quemamos un trozo de madera, nos comemos una zanahoria o uncimos un caballo al arado, estaremos valiéndonos de

unos flujos de energía derivados de la luz solar recibida en los últimos doce meses, o como mucho de la absorbida en unas cuantas décadas. A finales del siglo XVIII, varios economistas de la Europa occidental empezaron a sospechar que las sociedades de su continente se hallaban muy cerca de alcanzar el nivel de explotación máximo de esos flujos. Se basaban en una serie de cálculos muy sencillos. Los flujos energéticos que impulsaban a las sociedades humanas procedían sobre todo de las tierras de cultivo y de los espacios forestales, a lo que podía añadirse el reducido plus de la energía obtenida con el aprovechamiento del viento y la lluvia. Por consiguiente, todo aumento del crecimiento implicaba encontrar nuevos bosques y campos fértiles. En torno al año 1800 comenzó a pensarse que ya se estaban explotando todos los suelos productivos. Poco antes, en 1776, Adam Smith, el fundador de la economía moderna, había argumentado que el consumo global de las sociedades humanas no tardaría en drenar la totalidad de la energía disponible. Llegado ese momento, proseguía, el crecimiento se detendría; los salarios se reducirían y como consecuencia de ello menguarían también las cifras demográficas, pues las sociedades agrícolas y ganaderas se enfrentarían al límite de captación de flujos de energía que se impone a todos los seres vivos que colman la capacidad de su nicho ecológico.[13] Algunas de esas sociedades, como la holandesa y la británica, parecían estar forzando ya esa limitación natural. En los Países Bajos, los campesinos se veían obligados a arrancar tierras cultivables al mar, e Inglaterra se enfrentaba a la creciente escasez de madera, lo que ponía en un brete la continuidad de las calefacciones domésticas, la construcción de edificios y la fabricación de barcos. Según nos recuerda Alfred Crosby, en tiempos de Adam Smith «la humanidad había alcanzado el techo de la capacidad de aprovechamiento de la energía solar».[14]

Las presiones que espoleaban la búsqueda de nuevas fuentes de energía alentaron la aparición de las megainnovaciones que hoy asociamos con la llamada «revolución de los combustibles fósiles». Estas sustancias permitieron a los seres humanos acceder a unos

flujos de energía mucho mayores que los que podían procurarles la actividad agrícola y ganadera, ya que con ella se estaba explotando una energía antiquísima, contenida en unos concentrados cuya acumulación no había durado unas cuantas décadas, sino que llevaba verificándose desde el período Carbonífero, hace más de 360 millones de años. En los filones y yacimientos de carbón, petróleo y gas descansaban bajo tierra varios cientos de millones de años de luz solar, materializada en forma sólida, líquida y gaseosa. Para hacernos una idea de la energía presente en los combustibles fósiles, imaginemos que tenemos que cargarnos a la espalda un coche lleno de pasajeros y correr, con él encima, a gran velocidad y durante varias horas. Ahora recordemos que unos cuantos litros de gasolina almacenan esa cantidad de energía; e incluso más, puesto que una parte muy importante se desperdicia. Como ocurre cuando se encuentra una mina de oro, esa enorme abundancia de energía generó un conjunto de modalidades de intercambio tan frenéticas y a menudo tan caóticas que se dieron unas circunstancias muy particulares, del tipo capaz de crear y destruir la fortuna de mucha gente, ya fueran simples individuos, países o regiones enteras. Charles Dickens, Friedrich Engels y otros autores comprendieron enseguida el terrible precio que muchos deberían pagar para que semejante transformación se materializara. Aun así, de ese arrebato energético surgiría un mundo totalmente nuevo.

Las mutaciones se iniciaron con las grandes innovaciones que permitieron convertir la energía del carbón en energía mecánica de bajo coste y hacer funcionar con ella fábricas, locomotoras, barcos de vapor y turbinas. Muchas sociedades conocían las propiedades del carbón, pero era un mineral difícil de extraer y transportar que además generaba mucha suciedad y malos olores al ser quemado. Por consiguiente, la mayor parte de las poblaciones de las sociedades agrarias prefirieron obtener calor y energía de la madera. No obstante, había zonas en las que apenas se encontraba madera. En Inglaterra, el crecimiento demográfico provocó la expansión de las ciudades (sobre todo en el caso de Londres) y propició que el

comercio viviera un período de enorme desarrollo, con lo que la demanda de energía empezó a superar las existencias disponibles. Inglaterra fue uno de los primeros países del mundo en notar los efectos de la escasez de energía. Sin embargo, a diferencia de otros muchos estados, el inglés contaba con un segundo tipo de recurso. No solo disponía de vastas reservas de carbón, sino que las vetas de este mineral se hallaban bastante próximas a la superficie, en muchos casos cerca de los ríos o del litoral, lo que permitía transportarlo de forma barata y sencilla, bien por mar, bien mediante canales navegables, hasta las principales ciudades, entre las que desde luego se encontraba Londres. Así pues, las industrias y los hogares británicos empezaron a pasarse al carbón. En el siglo XVII, tanto los cerveceros como los fabricantes de ladrillos y los panaderos usaban ya esa nueva fuente de energía, de modo que los habitantes de Londres empezaron a quejarse de la mala calidad del aire. En 1700, el carbón producía ya el 50 % de la energía de la nación. En 1750, la energía producida con este material era ya equivalente a la generada por cuatro millones de hectáreas de bosques (el equivalente a poco menos que el 15 % de Inglaterra y Gales).[15] La dependencia del carbón animó a quienes lo extraían de las minas, se encargaban de su transporte o lo vendían, a producirlo en mayores cantidades (y a mejor precio).

Pero había un problema. El crecimiento de la demanda de ese combustible hizo que los mineros tuvieran que buscarlo a profundidades cada vez mayores, y en ellas las galerías se llenaban rápidamente de agua, así que la obtención de nuevas remesas de carbón empezó a requerir la construcción de bombas de drenaje más eficientes para mantener secos los pozos de explotación. En Inglaterra, el número de incentivos que animaban a quien tratase de encontrar una solución para este problema tecnológico era superior a los que pudieran existir en cualquier otro lugar, lo que significa que la concepción de una bomba barata y eficaz se convirtió en uno de los objetivos más importantes para empresarios e inventores. De este modo, los principios de la nueva ciencia, añadidos a la amplia

difusión de la habilidad mecánica, se convirtieron en el telón de fondo intelectual que se precisaba para superar la dificultad. Los científicos del siglo XVII habían empezado a comprender el funcionamiento de la presión atmosférica, de manera que a principios del XVIII, Thomas Newcomen llevó a la práctica esos conocimientos con la invención de una máquina de vapor destinada a drenar el agua de las minas de carbón.[16] Sin embargo, el aparato de Newcomen, que resultó poco eficiente, consumía enormes cantidades de carbón por lo que, en términos comerciales, solo tenía sentido emplearlo en las minas de dicho mineral, donde podía conseguirse a muy bajo precio. Los inversores, inventores e ingenieros comprendieron que la creación de unas bombas de drenaje mejoradas podía ofrecerles enormes beneficios y revolucionar el suministro de carbón a los hogares y las industrias inglesas.

James Watt, que a la postre sería quien descubriera la forma de resolver estos problemas técnicos, era un fabricante de instrumentos escocés con muy buenos contactos entre los ingenieros, los científicos y los empresarios. Un domingo de 1765, mientras daba un paseo vespertino, Watt tuvo de pronto una idea luminosa que le permitiría aumentar la eficiencia del artilugio de Newcomen: bastaba con añadir al diseño original un segundo cilindro que actuara como condensador. Sin embargo, la construcción de esa máquina de vapor perfeccionada no solo implicaba manejar principios científicos y recursos tecnológicos de última generación, sino que también requería el diseño y la fabricación de una serie de pistones fresados con la máxima precisión para que pudieran soportar las elevadas presiones a las que se verían sometidos. Se trataba de una tarea tan exigente como cara. No obstante, el principal respaldo económico con contaba Watt, Matthew Boulton, tuvo la clara sensación de hallarse ante una buena oportunidad, así que invirtió importantes sumas de dinero en las investigaciones de Watt. Boulton se dio cuenta de que una máquina capaz de convertir la energía del carbón en energía mecánica a precios razonables podía proporcionar unas

ganancias inmensas. En 1769, fecha en que Watt adquirió la primera patente de su diseño, la competencia era encarnizada, hasta el punto que cuando Boulton alardeó ante el embajador ruso en Londres de las ventajas de los prototipos de Watt, este consiguió una lucrativa oferta de trabajo del gobierno ruso. El inventor escocés sopesó seriamente la posibilidad de aceptar el ofrecimiento, pero Boulton le convenció de que se quedara en Inglaterra. Finalmente, en 1776, el nuevo aparato quedó listo para salir a escena.

La máquina de vapor de James Watt permitió vislumbrar por primera vez la posibilidad de manejar unos flujos de energía descomunales; y de hecho, gracias ellos las sociedades humanas experimentaron una transformación total en apenas dos siglos. Como ya vimos en el caso de las energías de activación susceptibles de poner en marcha una potente reacción química, la energía de los combustibles fósiles generó un pulso energético que desencadenó el equivalente tecnológico de una reacción en cadena global. En el breve plazo de veinticinco años empezaron a operar en Inglaterra quinientos nuevos aparatos de Watt, de modo que en la década de 1830 las máquinas de vapor alimentadas con carbón eran ya la principal fuente de energía de la industria británica. El consumo de energía del Reino Unido se disparó. En 1850, Inglaterra y Gales consumían por sí solas una cantidad de energía nueve veces superior a la de Italia, y las fábricas y los emprendedores ingleses tenían a su disposición unos motores dotados de una potencia increíble. Las locomotoras a vapor podían generar doscientos mil vatios de energía (como se sabe, Watt dio su nombre a la unidad de potencia), lo que equivale más o menos a doscientas veces la energía generada por dos caballos uncidos para arar (y no olvidemos que esa fue la principal fuerza motriz a lo largo de toda la era agraria). En el siglo XIX podía utilizarse más cantidad de energía barata que nunca. La industria inglesa despegó. Y el carbón empezó a generar tanta energía como la que podría haberse extraído de los bosques que cubrían el 150 % de la región de Inglaterra y Gales.[17]

Los inicios de la industrialización

Inglaterra, el primer país en beneficiarse de la abundancia de energía de los combustibles fósiles, asistió a un ascenso fulgurante de la producción. A mediados del siglo XIX, este país producía la quinta parte del producto interior bruto mundial y cerca de la mitad de las emisiones globales debidas a los combustibles fósiles. No es de extrañar que los niveles de dióxido de carbono presentes en la atmósfera del planeta empezaran a aumentar a partir de mediados del siglo XIX. Muy poco después, en 1896, el químico sueco Svante Arrhenius sostenía ya que el dióxido de carbono no solo era un gas de efecto invernadero, sino que estaba emitiéndose en cantidades lo suficientemente importantes como para desencadenar un primer atisbo de cambio climático.

Sin embargo, esos temores eran cosa reservada al futuro. (De hecho, Arrhenius pensaba que el calentamiento global constituía una evolución positiva porque mantendría a raya una eventual glaciación.) Entretanto, los emprendedores y los gobiernos de otros países empezaron a ambicionar una parte del abundante pastel que suponía la energía barata, así que mientras unos suplicaban que se les permitiese utilizar la nueva tecnología, otros la asumían en préstamo y otros más optaban incluso por robarla. Europa y los Estados Unidos de América, recién independizados, comenzaron enseguida a construir máquinas de vapor. La propagación de este tipo de aparatos provocó, como por oleadas, la irrupción de una larga serie de tecnologías revolucionarias, como las asociadas con las locomotoras o los barcos de vapor. Gracias a esos inventos se abarataron los transportes y surgieron otras innovaciones derivadas de ellos, sobre todo en el ámbito de la industria del hierro y el acero destinada a la fabricación de vehículos, cascos para las embarcaciones y vías férreas para los trenes. Los empresarios, ingenieros y científicos se pusieron a estudiar nuevas formas de explotar la barata energía de las máquinas de vapor, tanto en la construcción de edificios como en la industria textil.

Surgieron así muchos y muy potentes mecanismos de retroalimentación. El perfeccionamiento de las máquinas de vapor permitió llegar a minas más profundas, y esto a su vez redujo los costes de extracción del carbón. De este modo, entre los años 1800 y 1900, la cantidad total de mineral arrancado a las vetas se multiplicó por 55. La existencia de un carbón más barato redujo a su vez los gastos operativos de las máquinas de vapor en general, y en particular a abaratar (gracias a la locomotora y el barco de vapor) el coste del transporte de ganado, carbón, artículos de consumo y personas, tanto por tierra como por mar, lo que avivó el comercio global. La construcción de trenes y vías férreas incrementó la demanda de hierro y acero, y por otra parte, las innovaciones introducidas en la producción de este último permitieron la utilización económica de este material noble, que por primera vez pudo aplicarse a bienes fabricados en masa, como los recipientes de hojalata, abriéndose así la puerta a un nuevo modo de almacenar y conservar los alimentos. Hubo también un cúmulo de efectos secundarios inesperados. La utilización del vapor para devanar y tejer piezas de tela incrementó la demanda de algodón en bruto, y esto a su vez estimuló el cultivo de esa planta tanto en Estados Unidos como en el Asia Central y Egipto. Por su parte, la producción industrial de tejidos aumentó la demanda de productos secundarios como los tintes y decolorantes artificiales, estimulando así la aparición de la industria química moderna, cuyos géneros procedían en muchos casos del propio carbón.

La disponibilidad de una energía barata espoleó la experimentación y la inversión en un gran número de tecnologías inexploradas. Una de las más destacadas fue la electricidad. En la década de 1820, Michael Faraday comprendió que se podía generar una corriente eléctrica haciendo girar una bobina de metal en un campo eléctrico. En la década de 1860, la invención de los generadores impulsados mediante máquinas de vapor hizo posible la producción de electricidad a gran escala. De un modo similar a lo que vimos en relación a las bombas de protones y las moléculas de

ATP de las primitivas células procariotas, la electricidad y los motores eléctricos también permitieron distribuir la energía de una forma novedosa y eficiente. Una vez transformada en electricidad, la energía podía enviarse a bajo coste tanto a las factorías como a los hogares. La bombilla eléctrica dio un vuelco a la vida doméstica y modificó radicalmente el trabajo en las fábricas, ya que convirtió la noche en día e inició un proceso que llevaría a la iluminación nocturna de las ciudades, las carreteras y los puertos. Por otra parte, la electricidad también revolucionó las comunicaciones. A principios del siglo XIX, la manera más rápida de mandar un mensaje por vía terrestre aún era utilizar emisarios de correos a caballo. El telégrafo, inventado en 1837, hizo que las comunicaciones se realizaran a la velocidad de la luz. Y a finales del siglo XIX, los teléfonos y las radios permitieron transmitir conversaciones reales de forma más o menos instantánea, aun cuando salvaran distancias enormes.

Las nuevas tecnologías revolucionaron la guerra y la industria armamentística. El desplazamiento de los ejércitos y sus pertrechos empezó a hacerse en trenes y barcos de vapor, lo cual aceleró como nunca antes sus movimientos. En 1866, Alfred Nobel inventó la dinamita, un nuevo explosivo sumamente potente. Añadidos a la mejora de los revólveres y las ametralladoras, los explosivos multiplicaron la capacidad letal de los ejércitos. La potencia destructiva de las armas industriales pudo apreciarse con claridad en la guerra de Secesión estadounidense, que sin duda fue la primera contienda respaldada por el uso de combustibles fósiles. Además, la participación de barcos de vapor, con sus cascos de acero y su moderno armamento, transformó los combates navales —circunstancia que permitiría a Gran Bretaña batir a la armada de la China imperial en tiempos de las guerras del Opio—. A finales del siglo XIX, apoyándose en la riqueza acumulada, en las nuevas tecnologías y en los caudales de energía abiertos por la revolución industrial, los países de la otrora retrasada Europa comenzaron a adueñarse de buena parte del mundo, dando con ello pie a la era del imperialismo.

Muchos mecanismos de retroalimentación contribuyen a explicar el extraordinario dinamismo de la revolución industrial y el rápido crecimiento de la riqueza y el poder de las primeras regiones que se adentraron en el terreno de la industrialización, y en la mayoría de los casos esos bucles de refuerzo positivo son atribuibles al surgimiento de nuevos flujos de energía barata. En todas partes, país tras país, la disponibilidad de caudales energéticos económicos permitió y estimuló la innovación, facilitando al mismo tiempo la inversión en muchas y muy diversas áreas de la actividad fabril e industrial. Al final, la barata energía del carbón impulsó la aparición de una serie de innovaciones destinadas a movilizar a su vez el aprovechamiento de nuevas formas de energía derivada de los combustibles fósiles (en esta ocasión, gracias a la explotación del petróleo).

Al igual que el carbón, también el crudo era una materia familiar. Se extraía desde tiempos inmemoriales allí donde afloraba a la superficie, y se había empleado en la elaboración de betún, medicamentos e incluso armas incendiarias.[18] A mediados del siglo XIX, en forma de queroseno, el petróleo empezó a utilizarse para los sistemas de alumbrado, ya que era una buena alternativa al aceite de ballena, cuyo precio no cesaba de aumentar debido a que la caza abusiva reducía cada vez más el número de cetáceos. Sin embargo, el suministro de aceite mineral era muy escaso. Con todo, había quienes sospechaban que existían grandes cantidades de esa sustancia en las profundidades del subsuelo y que podría llegarse hasta ellas mediante unas técnicas de perforación importadas de China, ya que en ese país se habían inventado unos taladros especiales para extraer sal gema. De hecho, se sabía que en algunas ocasiones los sondeos efectuados en busca de un depósito de sal habían hallado alguna bolsa de petróleo. Edwin Drake fue quien promovió el primer intento serio de perforar la tierra con el objetivo de encontrar petróleo. Los trabajos se iniciaron en 1857, en la arruinada población de Titusville, en Pensilvania. El 27 de agosto de 1859, cuando los fondos de que disponían estaban a punto de

agotarse, la perforadora de Drake encontró petróleo. Esto precipitó la llegada en masa de toda clase de buscadores dispuestos a comprar tierras donde iniciar prospecciones, de modo que en apenas quince meses Titusville y sus alrededores vieron brotar nada menos que setenta y cinco pozos de extracción. Así explica la situación una persona que visitó la zona en esa época: la gente «negocia los precios de los derechos de concesión y de las acciones, compra y vende yacimientos, consigna la profundidad de los pozos, exhibe muestras o señala su rendimiento, etcétera, etcétera. Los que se marchan indican a los que llegan cuál es el pozo al que han visto producir cincuenta barriles diarios de petróleo puro [...]. La noticia hará que mañana venga aún más gente [...]. Ni en tiempo de enjambrar se ha visto una sola colmena de abejas más industriosa que la que forman estos batidores, y ninguna hace tanto ruido como esta».[19] En 1861, los operarios de las perforadoras hallaron el primer surtidor —es decir, un pozo petrolífero que bombea espontáneamente el crudo al exterior debido a la presión de la cámara que lo contiene (y que a veces puede llegar a provocar explosiones letales, en caso de que prenda fuego el gas natural que arrastra consigo el petróleo)—. La producción creció hasta alcanzar los tres mil barriles diarios.

Mucha gente amasó una fortuna con el petróleo, pero no Edwin Drake, que murió en la miseria en 1880, pese a haber contribuido a inaugurar el segundo capítulo de la revolución de los combustibles fósiles.

Capítulo 11

EL ANTROPOCENO: UMBRAL 8

> «No estamos ya en el Holoceno. Vivimos en el Antropoceno.»
>
> Paul Crutzen, afirmación espontánea en una conferencia celebrada en el año 2000

> «El hombre como criatura dedicada a reunir alimento reaparece de la manera más insospechada en forma de recolector de información. En este sentido, el hombre electrónico no es menos nómada que sus antepasados del Paleolítico.»
>
> Marshall McLuhan, *Comprender los medios de comunicación*

En el siglo xx, los seres humanos empezamos a transformar nuestro entorno, nuestras sociedades e incluso nuestra propia forma de ser. Aunque en realidad no haya respondido a un plan consciente, lo cierto es que hemos provocado cambios tan rápidos y tan generalizados que nuestra especie ha quedado convertida en una suerte de nueva fuerza geológica. A ello se debe que muchos estudiosos hayan comenzado a señalar que el planeta Tierra ha entrado en una nueva era: el período Antropoceno, o «era de los seres humanos». En los cuatro mil millones de años de historia de la biosfera, es la primera vez que una especie biológica se convierte por sí sola en el vector predominante de un cambio de tal magnitud. En apenas uno o dos siglos, sirviéndonos de unos enormes flujos de

energía y de las notables innovaciones que ha traído consigo la revolución de los combustibles fósiles, los seres humanos hemos acabado por asumir el papel de pilotos del planeta sin saber realmente en qué instrumentos de control debemos fijarnos, qué botones debemos pulsar ni a dónde nos proponemos llegar. Hemos entrado en un territorio inexplorado no solo para nosotros, sino para la totalidad de la biosfera.

La gran aceleración

Si tomamos distancia y nos despreocupamos por un instante de los detalles, la época antropocena parece ser un drama en tres actos, al menos por el momento, aunque todavía haya un montón de cambios en fase de gestación.

El telón se levantó a mediados del siglo XIX y el primer acto se inició con la transformación que las tecnologías asociadas con los combustibles fósiles introdujeron en el conjunto del globo. Un puñado de países de la región atlántica obtuvieron unas riquezas y un poder verdaderamente colosales, y se dotaron además de unas aterradoras armas ofensivas nuevas. Se abría así una tremenda brecha entre las primeras potencias que explotaron los combustibles fósiles y el resto del mundo. Esta abismal divergencia de poderío y prosperidad duraría más de un siglo y no empezaría a reducirse hasta finales del siglo XX.

Estas diferencias dieron lugar al desequilibrado universo imperial de finales del siglo XIX y principios del XX. De pronto, los países de la región atlántica, cuya relevancia había sido marginal durante buena parte de la era agraria, empezaron a dominar, y en ocasiones a gobernar, casi la totalidad del mundo, incluidas muchas zonas de África y del territorio que un día obedeciera a los grandes emperadores asiáticos radicados en la India y China. Fuera de la nueva área axial atlántica, el primer impacto de las tecnologías asociadas con la explotación de los combustibles fósiles se ejerció en

el ámbito de los artefactos destructivos, pues el desembarco de esas técnicas novedosas llegó acompañado de los pertrechos militares de los invasores extranjeros. El Némesis, el primer cañonero de vapor con casco de acero, provisto de diecisiete bocas de fuego y capaz de navegar a gran velocidad en aguas someras, contribuyó a dar a Inglaterra el control de los puertos chinos durante la primera guerra del Opio, entre 1839 y 1842. La armada china, que en otra época había sido la mayor del mundo, era muy vulnerable ante ese tipo de armas.

En pocas décadas, el poderío comercial y militar de Europa socavó la fuerza de los antiguos estados y desbarató sus formas de vida tradicionales. La producción textil basada en el uso de hiladoras mecánicas y telares de vapor arruinó a los artesanos que manufacturaban tejidos en la India, país que durante la era agraria había sido el principal productor de telas de algodón. A medida que aumentara el control político y militar de Gran Bretaña sobre el subcontinente indio, el gobierno británico consolidaría ese desequilibrio impidiendo la introducción de tejidos indios en los mercados ingleses. Incluso la construcción de las principales vías férreas indias resultaría más beneficiosa para Gran Bretaña que para ese país asiático. Los raíles, trenes y vagones se fabricaban en su mayor parte en Inglaterra, y la concepción de la vasta red ferroviaria india respondía sobre todo a las necesidades británicas, pues respondía a la intención de trasladar a las tropas de forma rápida y económica, permitir la exportación de las baratas materias primas indias e importar los artículos manufacturados ingleses. En las dos Américas, África y Asia, la creciente demanda de azúcar, algodón, caucho, té y otros productos básicos estimuló la creación de plantaciones nefastas para el medioambiente, y su explotación se llevó a cabo muy a menudo mediante mano de obra casi esclavizada. Las guerras en que las ametralladoras se enfrentaban a simples gavillas de lanzas y azagayas permitirían a las potencias europeas repartirse el continente africano y gobernarlo durante casi todo un siglo.

Las conquistas económicas, políticas y militares de Europa contribuyeron a generar un sentimiento de superioridad entre los europeos, o los occidentales, lo que hizo que muchos de ellos comenzaran a considerar que sus conquistas formaban parte de una supuesta misión de Occidente, llamado a civilizar y modernizar al resto del mundo. Para este tipo de personas, la industrialización constituía un signo de progreso, parte de la misión transformadora que la Ilustración había sido la primera en defender al sugerir que era necesario «perfeccionar» el mundo, es decir, convertirlo en un lugar mejor, más rico y más civilizado para los seres humanos.

El segundo acto del Antropoceno fue de una violencia excepcional. Se inició a finales del siglo XIX y se prolongó hasta mediados del XX. Durante la función, las primeras potencias basadas en la energía de los combustibles fósiles se revolvieron unas contra otras. A finales del XIX, Estados Unidos, Francia, Alemania, Rusia y Japón empezaron a desafiar el liderazgo industrial de Gran Bretaña. Cuando la rivalidad entre las naciones en liza se intensificó, las principales potencias intentaron proteger sus mercados y sus fuentes de suministro, y para ello expulsaron o excluyeron a los competidores. El comercio internacional entró en crisis. En 1914, la pugna se transformó en una guerra total. Durante treinta años, las nuevas tecnologías y la creciente riqueza de las poblaciones de la era moderna se movilizaron para alimentar una destructiva sucesión de choques armados.

Otras regiones del mundo se vieron arrastradas al conflicto, sin que pueda decirse que la brutalidad de las embestidas registradas en China y Japón fuera menor que las vividas en Rusia y Alemania. Con la penetración de la roja neblina de la guerra en Europa, África, Asia y el Pacífico, los enfrentados gobiernos de la época se enzarzaron con ahínco en una competición orientada al desarrollo de armas de creciente poder letal. La ciencia proporcionó a los combatientes unas armas tan nuevas como aterradoras, algunas de las cuales se servían de la energía contenida en los núcleos atómicos. El 6 de agosto de 1945 despegaba de las islas Marianas,

en pleno océano Pacífico, un bombardero estadounidense B-29 «Superfortaleza» que poco después arrojaba un artefacto atómico sobre la localidad japonesa de Hiroshima. El proyectil destruyó gran parte de la ciudad y segó la vida de ochenta mil personas. (Y en menos de un año fallecerían setenta mil más a causa de las heridas y la radiación.) Tres días después, el 9 de agosto, se arrojaba sobre la población de Nagasaki una bomba similar.

El tercer acto del Holoceno abarca la segunda mitad del siglo XX y los primeros años del XXI. Estados Unidos y la Unión Soviética salieron del baño de sangre de las dos guerras mundiales convertidos en las dos primeras superpotencias de carácter global. Hubo numerosos enfrentamientos bélicos locales, dirigidos en su mayor parte a abolir la dominación colonial europea u occidental, pero lo cierto es que en el período de la guerra fría no estalló ninguna otra gran conflagración internacional. Llegadas las cosas a ese punto, todas las potencias comprendieron que en la eventualidad de una guerra nuclear no habría ningún vencedor, lo que no impidió que surgieran varias situaciones límite. Poco después de la crisis de los misiles en Cuba en 1962, el presidente John F. Kennedy admitía que «las probabilidades de que hubiera estallado una guerra nuclear total habían oscilado entre el 33 % y el 50 %».[1]

Las cuatro décadas siguientes a la segunda guerra mundial asistieron al pico de crecimiento económico más notable de toda la historia de la humanidad. Fue el período que ha acabado conociéndose como la Gran Aceleración.

La actividad comercial global se reanudó y se intensificó. Según la estimación de una prestigiosa fuente, en los cuarenta años anteriores a la primera guerra mundial el incremento de valor del comercio internacional se verificó, en promedio, a un ritmo aproximado del 3,4 % anual; entre 1914 y 1950, este índice cayó en picado hasta situarse en el 0,9 %; pero después, de 1950 a 1973, se recuperó hasta alcanzar más o menos un 7,9 % al año, antes de volver a decrecer ligeramente y situarse en el entorno del 5,1 % entre 1973 y 1998.[2] En 1948, veinte estados firmaron el Acuerdo

General sobre Aranceles Aduaneros y Comercio (GATT, según sus siglas inglesas), mediante el cual se eliminaban o suavizaban las barreras impuestas al comercio internacional. Las tecnologías de guerra empezaron a destinarse así a fines más pacíficos. Si el petróleo y el gas natural habían contribuido a la abundancia energética del siglo XIX, la energía nuclear, como contrapunto pacífico de las armas atómicas, haría lo mismo en el XX. La productividad alcanzó cifras astronómicas, primero en los países de economía sustentada en los combustibles fósiles y más tarde en otros lugares. El consumo también se disparó, debido a un tiempo al crecimiento de la producción y a que los fabricantes buscaban siempre nuevos mercados, tanto domésticos como internacionales. En las naciones más acomodadas surgió así la era del automóvil, de la televisión, de las casitas en urbanizaciones de ensueño, y, finalmente, de los ordenadores, los teléfonos móviles e Internet. Con ello se empezó a gestar una nueva clase media y se inauguró un período marcado por la propagación de la revolución industrial, que empezó a rebasar los límites de los viejos feudos industriales. A principios del siglo XX, las tecnologías industriales habían transformado ya buena parte de Asia y Sudamérica, así como algunas regiones de África, y lo habían hecho además con la misma profundidad y rapidez con que en su día provocaran la metamorfosis de las sociedades europeas. La riqueza y el poder de esas otras regiones del mundo crecieron de forma directamente proporcional al incremento de su misma industrialización. Volvió a emerger, por tanto, un mundo presidido por la existencia de diversos núcleos de influencia y prosperidad. Apenas doscientos cincuenta años después de la invención de la máquina de vapor moderna, las tecnologías asociadas con los combustibles fósiles lograban la completa transformación del planeta.

Durante el período de la Gran Aceleración, la movilización de energía y recursos del conjunto de la humanidad alcanzó una escala tan inaudita que nuestra especie empezó a alterar la biosfera. Por

eso muchos analistas sitúan el arranque del Antropoceno en torno a los años cincuenta del siglo XX.

La transformación del mundo: las distintas tecnologías y la ciencia

La innovación impulsada por una energía barata fue el principal agente del cambio. Estas innovaciones generaron unos gradientes de riqueza y poder cada vez más acusados, gracias a los cuales se estimuló la competencia. Y dado que esta última fomentaba a su vez la aparición de más innovaciones, la situación acabó por instaurar un potente ciclo de retroalimentación. Los emprendedores y los gobiernos no solo se arrancaban unos a otros todas aquellas innovaciones que prometieran alguna ventaja industrial o militar, también invertían en las empresas, los científicos, los departamentos, las universidades y los institutos de investigación capaces de generar y difundir nuevas tecnologías y saberes.

Las guerras de la primera mitad del siglo XX hicieron que la innovación progresara a marchas forzadas. Durante la primera guerra mundial, Alemania sufrió una grave escasez de fertilizantes, y los científicos alemanes, encabezados por Fritz Haber y Carl Bosch, inventaron un sistema para extraer nitrógeno del aire y elaborar así abonos artificiales. El nitrógeno no es un gas excesivamente reactivo, así que no les resultó fácil conseguir su objetivo. Los procariotas ya habían conseguido resolver el problema hace varios miles de millones de años, pero Haber y Bosch fueron los primeros organismos multicelulares que lograron fijar el nitrógeno atmosférico. El proceso de Haber-Bosch emplea enormes cantidades de energía para vencer la resistencia a la combinación química del nitrógeno, de modo que solo pudo llevarse a la práctica en un mundo dominado por los combustibles fósiles. Lo cierto, sin embargo, es que los abonos artificiales nitrogenados transformaron la agricultura, incrementaron la productividad de las tierras de cultivo del mundo entero e hicieron posible alimentar a varios

millones de seres humanos más que antes de su invención. Puede decirse que estos fertilizantes convirtieron la energía de los combustibles fósiles en comida.

Como hemos señalado, uno de esos combustibles fósiles, normalmente líquido a temperatura ambiente (el petróleo), ya había sido utilizado en el siglo XIX como sustituto del aceite de ballena en la iluminación. Los primeros motores de combustión interna, desarrollados en las décadas de 1860 y 1870, señalaron el camino que había que seguir para generar energía mecánica por medio del petróleo. A diferencia de las máquinas de vapor, cuya fuente de calor se sitúa fuera de las partes móviles del propulsor mismo, los motores de combustión interna utilizan las elevadas temperaturas producidas por los combustibles fósiles para impulsar directamente una serie de pistones, rotores o álabes (en el caso de las turbinas). A finales del siglo XX, los motores de combustión interna conocieron una rápida expansión, en gran medida porque se habían utilizado con éxito en tiempos de guerra, tanto para transportar soldados y pertrechos como para hacer más maniobrables los tanques primitivos. También se instalaron en los primeros aviones militares, con los que nació el siniestro arte de lanzar explosivos desde el aire. Al terminar las guerras, los fabricantes de automóviles y aeroplanos convirtieron en su objetivo los mercados civiles para crear un mundo poblado tanto por un creciente número de propietarios o usuarios de coches como por un volumen cada vez mayor de individuos dispuestos a viajar en avión. Los inmensos petroleros, portacontenedores y aviones de carga transformaron el comercio global.

La información arraiga en la médula misma de las tecnologías del Antropoceno. Las tecnologías de la información experimentaron un vuelco decisivo cuando los gobiernos empezaron a invertir en una expansión generalizada de la enseñanza y la investigación, y también dieron un salto cualitativo al empezar las empresas y las grandes compañías a financiar todas aquellas investigaciones destinadas a desarrollar y difundir nuevos productos y servicios. Para

descifrar los códigos empleados por el enemigo durante la segunda guerra mundial, los gobiernos inyectaron importantes sumas de dinero en la investigación de los fundamentos matemáticos de la información y la computación. Combinadas con la invención del transistor, conseguida a finales de la década de 1940, estas indagaciones sentarían las bases —en la segunda mitad del siglo xx — de la informatización de la ciencia, los negocios, la gobernación, las finanzas y la vida cotidiana. La ingeniería de los cohetes balísticos, surgida también durante la guerra, terminaría llevando al espacio a los seres humanos. Los gobiernos del período bélico habían puesto en marcha vastos programas de investigación destinados a la fabricación de armas nucleares. El llamado Proyecto Manhattan, creado por Estados Unidos, fue el organismo que produjo las primeras bombas atómicas, de entre las que sobresalen las que en 1945 se arrojaron sobre Hiroshima y Nagasaki. Lo que hicieron estos artefactos fue liberar la energía derivada de la desintegración de los núcleos de uranio. Poco después, la Unión Soviética desarrollaba una serie de armas nucleares propias gracias a la información que le habían filtrado algunos espías integrados en el Proyecto Manhattan. En apenas una década, tanto Estados Unidos como la Unión Soviética se dotaron de la tecnología necesaria para fabricar bombas de hidrógeno, con las que se desataba la muy superior energía de la fusión protónica (el mismo mecanismo que alimenta la combustión de todas las estrellas). Las primeras pruebas prácticas de la bomba H se llevaron a cabo en 1952.

Buena parte de esta efervescencia innovadora tenía como fuente de inspiración los fundamentales descubrimientos que posibilitaba el sobrealimentado entorno del aprendizaje colectivo en el que se basa la ciencia moderna. Albert Einstein desarrolló su teoría de la relatividad en las dos primeras décadas del siglo xx. Gracias a ella se logró ir más allá de la comprensión newtoniana del universo, al mostrar que la materia y la energía curvan el espacio y el tiempo, y que en esa curvatura reside además la causa real de la gravedad. Einstein también mostró que la materia podía convertirse en energía,

y de hecho, esa intuición acabó por sentar las bases científicas que desembocaron en la fabricación de armas atómicas y en la utilización de la energía nuclear. La física cuántica, concebida por esa misma época, permitió a los científicos penetrar a mayor profundidad en el extraño mundo probabilista del núcleo atómico. Sin esos conocimientos no existirían hoy las armas nucleares ni los transistores ni los sistemas de posicionamiento global ni los ordenadores. En los años veinte del siglo pasado, astrónomos como Edwin Hubble acertaron a encontrar las primeras pruebas de que nuestro universo se había iniciado con una gran explosión. En el campo de la biología, la idea de la selección natural de Darwin se vinculó con las leyes mendelianas de la herencia y con la mejora de los métodos estadísticos de Ronald Aylmer Fisher para engendrar la genética moderna.

Estas fueron, entren otras muchas, las principales intuiciones y tecnologías novedosas que dieron alas a la innovación y el crecimiento en la época de la Gran Aceleración. El incremento de la productividad permitió que las poblaciones humanas crecieran a mayor velocidad que nunca. En 1800, la Tierra contaba con novecientos millones de seres humanos. En 1900 éramos ya mil quinientos millones. En 1950, cuando yo era un chiquillo, la masa humana del planeta se situaba ya en dos mil quinientos millones de individuos (a pesar de la enorme mortandad que habían provocado las dos guerras mundiales). En los años que llevo de vida, la demografía humana ha añadido otros cinco mil millones de seres a sus anteriores activos. Estas cifras tan enormes pueden nublar la mente, así que vale la pena detenerse un momento para tratar de hacernos una idea clara de lo que significan. En los doscientos años transcurridos desde el inicio del siglo XIX, la cifra de la población humana ha crecido en más de seis mil millones de personas. Y en principio ha sido necesario alimentar, vestir, alojar y emplear a todos y cada uno de esos nuevos individuos, y muchos de ellos han recibido además una educación. El desafío que representa la producción de un volumen de recursos suficiente para mantener a

esos seis mil millones de seres humanos extra ha sido simplemente colosal; y más aún si pensamos que se ha conseguido en solo doscientos años.

Por asombroso que resulte, lo cierto es que el reto se ha cubierto (gracias a las modernas tecnologías, los actuales combustibles fósiles y las recientes mejoras en la capacidad de gestión). En los campos de la agricultura, la actividad fabril y el transporte la productividad se ha disparado. Aunque la comida y otras necesidades básicas no siempre lleguen a quienes más las necesitan, el volumen de alimentos producido en este período alcanzaría para procurar sustento diario a más de siete mil millones de personas. En este sentido, los cambios de mayor trascendencia se han producido en la elaboración de fertilizantes y pesticidas artificiales, en la utilización de maquinaria agrícola motorizada a base de combustibles fósiles, en la construcción de miles de presas destinadas a hacer posible el regadío y en la producción de nuevas cosechas, genéticamente modificadas. Las tecnologías agrícolas modernas han permitido cultivar una mayor cantidad de tierra, ya que en 1960 la superficie dedicada a las tareas del campo ya casi triplicaba los quinientos millones de hectáreas consignados en 1860.[3] Los barcos de arrastre, provistos de potentísimos motores diésel y de equipos de sonar específicamente concebidos para la detección de bancos de pesca, atrapan con sus inmensas redes casi todos los seres vivos de las zonas en que operan. Las capturas de la pesquería industrial han pasado de los 19 millones de toneladas de 1950 a los 94 millones de toneladas del año 2000, pese a que la sobreexplotación pesquera signifique un grave peligro de desaparición para muchos caladeros.

El perfeccionamiento de las tecnologías de la información ha facilitado la acumulación, el almacenamiento, la búsqueda, el seguimiento y la utilización de enormes cantidades de información, gracias a las cuales se ha incentivado la innovación y al mismo tiempo mantener en funcionamiento de las muy complejas sociedades modernas. Por su parte, las tecnologías vinculadas con las comunicaciones y el transporte han transformado el aprendizaje

colectivo, porque por primera vez en la historia han logrado crear una única red de intelectos, íntimamente interconectados, que no solo abarca la totalidad del globo sino que permite además gestionar y buscar nueva información en los titánicos bancos de datos electrónicos de los que disponemos. La noosfera, que es el ámbito propio de la mente, se ha convertido en uno de los más destacados motores de cambio de la biosfera. Los ordenadores, asequibles y potentes, han proporcionado a millones de personas una vía de acceso a un volumen de información superior al que podrían recabar en el conjunto de las bibliotecas del mundo premoderno. Combinados con las refinadas técnicas matemáticas del análisis estadístico contemporáneo, los ordenadores permiten que los gobiernos, los bancos, las grandes empresas y los individuos detecten la existencia y la evolución de un inmenso flujo de recursos. También posibilitan la comunicación instantánea entre las personas, y en cualquier parte del mundo, por medio de telegramas, teléfonos y la red. Si la capacidad de compartir la información es lo que confiere un poder tan notable a los seres humanos, debemos tener en cuenta que los ordenadores han multiplicado enormemente ese poder. Como siempre, el proceso también ha conllevado algunas pérdidas. Tal como debió de suceder con la capacidad de memorización, que muy probablemente disminuyó con la difusión de la escritura, también las facultades que nos permiten realizar cálculos han debido de decrecer con la expansión de los ordenadores y las calculadoras.

En el año 2000, la revolución de los combustibles fósiles se había extendido ya por casi todo el planeta, incluidas muchas de las regiones localizadas en los grandes ejes comerciales del pasado. Las enormes diferencias de riqueza y poder que habían mantenido separadas a las naciones a lo largo del siglo XIX empezaron a reducirse. Las potencias europeas, debilitadas por dos guerras mundiales, renunciaron a regañadientes a sus colonias, mientras que

los antiguos espacios dominantes de Asia, el Mediterráneo oriental, el norte de África y las dos Américas comenzaban a recuperar el retraso acumulado en materia de tecnología, riqueza y poder.

El factor subyacente a todos estos cambios fue la abundancia de la energía barata de los combustibles fósiles. La producción de carbón se incrementó en todas partes, y lo mismo sucedió con la producción de petróleo y gas natural. En Arabia, Irán y la Unión Soviética (e incluso a lo largo de las plataformas continentales) empezaron a surgir nuevos campos petrolíferos. Teniendo en cuenta solo lo ocurrido en el Oriente Próximo, la producción de petróleo pasó de los 28 mil millones de barriles del año 1948, a los 367 mil millones de 1972; es decir, en solo veinticinco años. El uso del gas natural se implantó de forma generalizada durante la Gran Aceleración. Si en el siglo XIX el consumo total de energía se había duplicado, en el XX se multiplicó por diez. El consumo de energía de los seres humanos creció a un ritmo muy superior al de su demografía.

La transformación del mundo: la gobernación y la sociedad

Los nuevos flujos de energía y las tecnologías revolucionarias del Antropoceno transformaron la naturaleza misma de la sociedad y las tareas de gobierno. En épocas pasadas la totalidad del género humano se dedicaba a la caza y la recolección, y su concepto de *gobernación* se correspondía con las «relaciones familiares». Cuando surgieron la agricultura y la ganadería, el número de personas arraigadas en aldeas campesinas que obtenían su sustento mediante el cultivo de la tierra y la cría de animales creció sin cesar. En las sociedades agrarias, el significado de la *gobernación* se centraba sobre todo en la extracción de la energía y los recursos de los campesinos. En la actualidad, la mayor parte de los seres humanos no tienen ya por qué dedicarse a labrar ni a pastorear para obtener su alimento y cubrir el resto de sus necesidades. Han pasado a ser

asalariados. Como ya ocurriera con los alfareros de la antigua Sumeria, las personas viven hoy del sueldo que reciben por realizar un trabajo especializado. Y eso ha transformado el carácter de la gobernación, pues hoy los gobiernos deben implicarse en la vida cotidiana del conjunto de sus ciudadanos. Esto se debe a que, a diferencia de los campesinos, los asalariados no pueden sobrevivir sin un gobierno. Las aldeas agrícolas y ganaderas podían llevar una vida feliz y tranquila lejos de los límites de las grandes civilizaciones agrarias, pero los asalariados dependen de la existencia de leyes, mercados, empresarios, tiendas y monedas. Al igual que la célula nerviosa, un empleado que viva de realizar un trabajo especializado es incapaz de sobrevivir por sus propios medios. Por eso el mundo de los asalariados muestra una cohesión mucho mayor que el de campesinos y ganaderos. Los gobiernos actuales regulan los mercados y el valor de las divisas, ofrecen protección a las empresas que generan empleo, organizan sistemas educativos de masas destinados a hacer extensivos los beneficios de la alfabetización al grueso de la población, y crean las infraestructuras necesarias para la circulación de bienes y personas. Para lograr todo esto, el número de ciudadanos que deben involucrar en las tareas propias de la gobernación y la administración es cada vez mayor.

Podemos observar el cambio que lleva a las sociedades a adoptar los modernos tipos de gobierno en el siglo XIX, pues cuando la industrialización levanta el vuelo asistimos, por un lado, al crecimiento de la cantidad de campesinos que se convierten en asalariados y, por otro, al aumento de los volúmenes de población que movilizan los gobiernos. La Francia revolucionaria, transformada por el vuelco de 1789 y sometida al ataque de buena parte de Europa, fue uno de los primeros estados modernos que recurrió al reclutamiento sistemático de soldados, extraídos del conjunto de la población. El gobierno de Estados Unidos también se forjó en el transcurso de un período bélico que le obligó a movilizar a gran parte de sus ciudadanos. Para conseguirlo, los gobiernos necesitaban disponer de un registro pormenorizado del número de

habitantes existente en su territorio, con detalles como su estado de salud y forma física, su nivel educativo, sus habilidades particulares, su riqueza y su grado de lealtad. En cambio, la mayor parte de los gobiernos tradicionales habían podido hacer caso omiso de todos estos extremos. Los gobiernos de la Francia revolucionaria y de Estados Unidos empezaron a explotar la lealtad de sus súbditos por medio de la democratización (y gracias a ella comenzó a atraerse a las tareas de gobierno a un creciente número de personas) y del nacionalismo (basado en un llamamiento a la percepción presente en el ánimo de la gente de pertenencia común a una nación). Estos estados comenzaron a ofrecer a un creciente número de sus súbditos (varones acaudalados, hombres de otro tipo y mujeres, por ese orden) la posibilidad de desempeñar algún papel en la gobernación mediante un mecanismo electivo. Valiéndose de los colegios y del rápido desarrollo de los medios de comunicación, los gobiernos intentaron penetrar en la mente de sus súbditos y generar así nuevas formas de lealtad. El nacionalismo demostró ser una potente forma de unir a personas de tradiciones, religiones e incluso lenguas diferentes. Logró movilizar los tradicionales instintos del parentesco construyendo en la mente de los ciudadanos una vasta familia imaginaria compuesta por millones de personas a las que cada individuo debía lealtad y servicio, y por la que podía tener que dar incluso la vida, en caso de que surgiera la crisis última de una contienda.

Las guerras totales de la primera mitad del siglo XX transformaron a los gobiernos en gestores económicos, dado que tuvieron que esforzarse en la total movilización de las personas y los recursos disponibles en las economías industriales modernas. Es posible seguir a grandes rasgos la evolución de la actividad gubernamental en su creciente papel de gestor económico. A finales del siglo XIX, el gobierno francés respondía de aproximadamente el 15 % del producto interior bruto nacional (el PIB es una estimación muy imprecisa de la producción total de un país). En esa época, la cifra parecía elevadísima. Por esos mismos años, los gobiernos de Gran

Bretaña y Estados Unidos representaban menos del 10 % de sus respectivos PIB. Los conflictos bélicos de principios del siglo XX obligaron a los gobiernos a intervenir más activamente en la gestión económica, con lo que a mediados del siglo XX su rol económico era ya mayor en todas partes. A principios del siglo XXI, el gasto nacional que controlan o gestionan por término medio los gobiernos de los países de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (u OCDE, fundada en 1960) se eleva ya al 45 % del PIB, con el añadido de que la mayoría de los países más prósperos se sitúan en una franja que oscila entre el 30 % y el 55 % de sus PIB.[4] Algunos gobiernos, como los de los regímenes comunistas de la Unión Soviética y China, intentaron entrar en la microgestión del conjunto de sus economías nacionales. La fuerza coercitiva de los gobiernos modernos también se ejerció a una escala mucho más amplia que la aplicada en su día por los sistemas de gobernación tradicionales, y se materializó además con unos ejércitos y unos contingentes policiales equipados con armas de última generación. El autor del *Artha-shastra*, el manual indio sobre las técnicas de gobernación escrito hace casi dos mil años, jamás habría imaginado que los estados pudieran tener semejante poder. Los gobiernos contemporáneos actúan a una escala y tienen un alcance, un poder y una influencia ante los que palidecen hasta los más poderosos gobiernos de la era agraria, que en comparación parecen simples pesos pluma.

En un mundo cada vez más interconectado, la gobernación también adopta formas más globales. A finales del siglo XX había ya muchas estructuras políticas (aunque no pudiera decirse todavía lo mismo de los gobiernos) capaces de realizar a escala global las tareas de gestión, orientación y administración de sus patrocinados. Entre esas entidades se cuentan por ejemplo las Naciones Unidas y el Fondo Monetario Internacional, además de una importante cantidad de compañías y organizaciones no gubernamentales (ONG) como la Cruz Roja, que desarrollan sus actividades en muy diversos

países. Esas instituciones representan el embrión de un nuevo nivel de gobernación de ámbito planetario que era impensable hace tan solo unos siglos.

Nuevas formas de ser y de vivir

Las transformaciones tecnológicas y políticas han ido acompañadas de una serie de cambios igualmente radicales en la forma de vida de los seres humanos, es decir, en el modo en que *percibimos* la existencia.

Los seres humanos modernos llevan una vida que habría dejado perplejos, confusos y posiblemente espantados a nuestros predecesores. Durante miles de años, la vida de la mayoría de las personas ha estado dominada por la variada gama de actividades diferentes que es preciso realizar en un hogar de campesinos: arar, sembrar, cosechar, dar de comer al ganado, ordeñar a las vacas, cortar leña para el fuego, recolectar setas o hierbas, parir y criar a los hijos, preparar la comida y tejer las fibras que uno mismo ha cultivado. Hoy, en cambio, la mayor parte de los agricultores y empresarios son individuos que cobran un salario. Trabajan en inmensas granjas industriales que especializadas en solo unos pocos tipos de cultivos, en algunos casos de plantas genéticamente manipuladas. Para el cultivo y el transporte de sus cosechas, estos modernos empleados agrarios utilizan toneladas de fertilizantes y pesticidas, así como máquinas cosechadoras, tractores y camiones; todos los cuales consumen grandes cantidades de energía. Los granjeros contemporáneos no cultivan sus productos para comer, sino para llevarlos al mercado. Son empresarios dedicados a gestionar un negocio. Solicitan préstamos a los bancos para poder así comprar, a compañías muy potentes, las semillas, los abonos y los vehículos que precisan.

La mayor parte de las personas no viven ya en ninguna aldea, sino en pueblos y ciudades. Lejos de los campos, las corrientes de agua y los bosques que caracterizan la existencia del campesino, la gente vive actualmente en unos entornos cuya configuración obedece casi por entero a la actividad humana. Con la proliferación de nuevos puestos de trabajo y el surgimiento de nuevas destrezas y competencias profesionales inéditas, los individuos deben dedicar más tiempo al aprendizaje. Lo que cuenta es más la información —en el sentido del conocimiento pericial propio de los expertos— que las habilidades genéricas de los campesinos. Cada vez es mayor el número de personas que disfrutan de unos niveles de nutrición y de salud muy poco frecuentes hace apenas un siglo. Esto se ha conseguido gracias a la productividad de la agricultura moderna y a los actuales avances de la medicina y la asistencia sanitaria. Las anestesias de nuestros días han puesto fin a los agónicos sufrimientos asociados con la mayoría de las intervenciones quirúrgicas tradicionales. (Ya no es preciso sobrellevar la amputación de un miembro o la extracción de una pieza dentaria con un simple lingotazo de licor.) Acaso lo más notable de todo sea que, en solo un siglo, estos cambios han logrado dar a la esperanza de vida de los seres humanos una duración superior al doble de la que existía anteriormente.

A pesar de las guerras del siglo XX, las relaciones interpersonales también son hoy menos violentas, al menos en la mayor parte de los casos. Este cambio obedece a una lógica muy clara: en los últimos cien o doscientos años la efectividad de la coerción como forma de controlar las conductas ha disminuido (¿cuándo fue la última vez que asistió usted a una flagelación pública?) y la brutalidad ha sido poco a poco sustituida por recompensas o sanciones económicas (es probable que ya haya pedido en alguna ocasión un aumento de sueldo). Pese a que en la actualidad la mayor parte de las personas piensen que la esclavitud y la violencia doméstica son prácticas inadmisibles, es importante recordar que en el siglo XVIII, sin ir más lejos, la trata de esclavos era un procedimiento respetable en buena

parte del mundo; que la tortura y la ejecución eran fórmulas punitivas habituales incluso en el caso de delitos menores y que, en general, se las consideraba una forma de entretenimiento público; y que las palizas o los castigos corporales se tenían por métodos normales y perfectamente aceptables para mantener el orden tanto en el seno de las familias como en los contextos escolares. La violencia personal continúa siendo una realidad demasiado habitual, pero si la evaluamos en relación con el número de individuos que pueblan actualmente el planeta, adevrtiremos que hoy es mucho más infrecuente que antes y que en casi todo el mundo se ha dejado de pensar que constituya una forma aceptable de control conductual.

En un universo de campesinos, la mayor parte de las personas vivían en niveles próximos a la mera subsistencia, era habitual y más que corriente padecer épocas de escasez y en la mayoría de los casos la abundancia se asociaba con la propiedad de una casa de sólida construcción, la ausencia de deudas y la posesión del dinero necesario para pagar los impuestos y alimentar y vestir a la familia. El mundo consumista de nuestros días es por completo diferente. Recibe su impulso de una serie de sistemas económicos que, en las regiones más prósperas del planeta, producen una riqueza material tan abundante que su propia perpetuación como tales sistemas depende de que la creciente clase media planetaria logre mantener constantes los niveles de consumo de masas. La idea de progreso, que la mayoría de nosotros damos por supuesta, también es nueva. A lo largo de casi toda la historia, la gente ha sobreentendido que, a menos que se produjera una catástrofe, la vida de los hijos sería tan larga como la de sus padres.

La actitud con la que se enfoca la relación con la familia y los hijos también ha experimentado cambios muy profundos. En los últimos siglos, la introducción de mejoras en los ámbitos de la nutrición y los cuidados médicos ha ido reduciendo la mortandad infantil, con lo que el número de niños y niñas que logran sobrevivir y alcanzar la edad adulta ha aumentado. En cambio, la actitud

tradicional de las sociedades campesinas consistía en cerciorarse de que las familias procuraran traer al mundo el mayor número de hijos posible. Este tipo de planteamientos, junto con el incremento de la producción de alimentos, la elevada fertilidad y el descenso de los índices de mortandad, contribuyó a fomentar el extraordinariamente rápido crecimiento demográfico al que hemos asistido en los últimos siglos. Sin embargo, con el paso del tiempo, las actitudes tradicionales empezaron a modificarse debido, entre otras cosas, a que las familias comenzaron a trasladarse a las ciudades, a que la educación y la crianza de los hijos se encareció y a que la cantidad de chicos y chicas que llegaban a la edad adulta iba en aumento. Las familias urbanas tendían a no cargarse tanto de hijos, así que las tasas de fertilidad decrecieron. Añadido al anterior descenso de la mortandad, la caída de esos índices dio lugar a lo que los demógrafos denominan la «transición demográfica», que consiste en la parición de un régimen demográfico nuevo marcado por unos índices de fertilidad y mortandad notablemente reducidos. Esto explica que en el siglo xx, los índices de crecimiento de la población entraran en una suave fase de desaceleración: primero en los países más prósperos, y más tarde en todo el mundo. Esto también nos ayuda a entender las razones de los fundamentales cambios registrados en los roles de género. La reducción de la presión que se ejercía sobre las mujeres, exigiéndoles que dedicaran la totalidad de su vida adulta a parir o criar a los hijos, desdibujó las tradicionales divisiones entre el papel del hombre y el de la mujer, y permitió que estas comenzaran a desempeñar tareas que les habían estado vedadas durante casi toda la era agraria.

Todos cuantos vivimos en la época actual estamos familiarizados con estos aspectos de la vida moderna, pero tal vez nos resulte más difícil advertir el contraste entre las características de nuestra existencia y las vigentes en el hoy extinto mundo agrícola y ganadero. Más complicado aún es evaluar adecuadamente el pasmoso incremento que ha experimentado la complejidad de las sociedades modernas, la forma en que todos y cada uno de los

detalles de nuestra vida cotidiana se inscriben en el marco de un conjunto de redes animadas por los millones de personas encargadas de generar los alimentos, los trabajos, los cuidados sanitarios, la educación, la electricidad, el carburante o la ropa que utilizamos. En cada una de estas cadenas de interconexiones pueden estar actuando miles de millones de seres humanos, vinculados por medio de los nodos de una larga serie de redes de fabulosa complejidad. En los momentos de ocio que se me presentan cuando hago escala en un aeropuerto, me entretengo en calcular cuántas personas intervienen en proyectar, construir, mantener y llevar de Sídney a Londres un Airbus 380. Si debilitamos cualquiera de los eslabones de esta cadena es evidente que nuestro mundo puede desmoronarse a una velocidad aterradora, como puede observarse hoy en aquellas regiones del mundo en que las estructuras estatales se han derrumbado. Kautilia, el autor del *Artha-shastra*, habría dicho que, en esas zonas, los seres humanos se rigen por «la ley de los peces», en alusión a que el grande se come al pequeño.

La transformación de la biosfera

La revolución de los combustibles fósiles y la Gran Aceleración, además de generar una importante transformación en las sociedades humanas, también están modificando la biosfera. Las actividades de los seres humanos están modificando la distribución de los organismos vivos y su número, y también alteran la química de los océanos y la atmósfera, reorganizan los paisajes, desnaturalizan los ríos y desequilibran los antiquísimos ciclos químicos que permiten que el nitrógeno, el carbono, el oxígeno y el fósforo circulen por la biosfera.

Los investigadores han destinado mucho tiempo antes de comprender que el impacto de las actividades humanas ha adquirido hoy una magnitud tan grande como la de los principales procesos bioquímicos que preservan la estabilidad de la biosfera. Como en

realidad no entendíamos lo que estábamos haciendo, empezamos a juguetear con los termostatos de la biosfera, sin ser conscientes de que llevan cuatro mil millones de años manteniendo las temperaturas de la superficie de la Tierra en márgenes habitables.

El carbono es central para la química de la vida, y su distribución en la atmósfera, el mar y la corteza terrestre ha determinado las temperaturas de la superficie del planeta a lo largo de toda su historia. Cuando extraemos energía de los combustibles fósiles bombeamos enormes cantidades de dióxido de carbono y las reinyectamos en la atmósfera. Sin embargo, hasta la década de 1950 los científicos no evaluaron el impacto que esto podía tener en el ciclo del carbono. En 1958, el científico estadounidense Charles Keeling empezó a medir en Hawái los niveles de dióxido de carbono atmosférico. Tras estudiar la situación durante unos cuantos años, descubrió que la concentración de ese gas estaba aumentando a un ritmo vertiginoso. Antes de la revolución de los combustibles fósiles, las emisiones de dióxido de carbono imputables al género humano no eran lo suficientemente elevadas para incidir en los niveles de dióxido de carbono de la atmósfera, pero en la actualidad las actividades humanas están liberando al aire del planeta diez mil megatoneladas de dióxido de carbono al año, y se estima que desde el inicio de la revolución industrial el volumen total de las emisiones habría alcanzado las cuatrocientas mil megatoneladas de dióxido de carbono.[5] La enorme importancia de estos cambios empezó a quedar de manifiesto cuando los científicos encontraron formas de medir las variaciones que han experimentado los niveles de dióxido de carbono a lo largo de varios cientos de miles de años. Uno de los métodos empleados consistió en analizar largas muestras cilíndricas de agua congelada del subsuelo o de los glaciares, conocidas con el nombre de «testigos de hielo». Estas catas contienen diminutas burbujas de aire que el hielo atrapa año tras año y que pueden indicarnos la composición que ha tenido la atmósfera en diferentes fases geológicas. Estos núcleos de hielo han mostrado que en los

dos siglos siguientes a la revolución industrial los niveles de dióxido de carbono de la atmósfera se han elevado hasta alcanzar valores jamás vistos en cerca de un millón de años.

Los cambios que percibió Keeling no solo eran perfectamente reales, también resultaban muy llamativos porque indicaban que el ciclo del carbono estaba experimentando una importante transformación. El aumento de las concentraciones de dióxido de carbono auguraba un ascenso de las temperaturas medias del clima planetario, y esto a su vez conllevaría el surgimiento de huracanes, tormentas y vientos más potentes, así como una subida del nivel de los océanos que inundaría las ciudades situadas al nivel del mar. Los efectos se mantendrían durante varias generaciones, pues una vez liberado a la atmósfera el dióxido de carbono permanece en ella durante mucho tiempo. Sin embargo, de todos los gases de efecto invernadero importantes, el dióxido de carbono no es el único cuyos niveles en la atmósfera han crecido acusadamente como consecuencia de las actividades humanas. En los dos últimos siglos, los niveles de metano se han elevado a una velocidad aun mayor, como consecuncia sobre todo de la gran difusión del cultivo de arroz en campos inundados y el aumento del número de cabezas de ganado destinadas al consumo doméstico. El metano es un gas de potentes efectos invernadero, aunque tiene la ventaja relativa de descomponerse con mayor rapidez.

A finales del siglo xx, los ordenadores permitieron a los científicos dedicados al estudio del clima elaborar modelos cada vez más refinados del impacto que estos cambios atmosféricos podían tener. Estos modelos sugieren que en pocas décadas, a medida que se regenere un clima más cálido como consecuencia de todas estas emisiones de gases de efecto invernadero, se irán derritiendo los glaciares y los casquetes polares, lo que provocará un aumento del nivel de los mares y sumergirá muchas ciudades costeras. Por otra parte, el aumento de la energía calorífica y de la evaporación generará pautas climáticas más extremas, lo que se dificultará notablemente la práctica de la agricultura. En el plazo de unas

cuantas décadas, los climas del globo seguirán unas pautas muy distintas a las que hemos conocido a lo largo del Holoceno, que han sido relativamente estables. Así explica la situación un climatólogo estadounidense: «El clima es un animal herido, y nosotros estamos azuzándolo con un palo».[6]

El nitrógeno es tan vital para la vida como el carbono. En 1890, el impacto de la población humana en el ciclo del carbono era insignificante. En esa fecha, los seres humanos extraían unas quince megatoneladas de nitrógeno de la atmósfera, debido sobre todo a actividades agrícolas y ganaderas —y hay que tener en cuenta que las plantas silvestres absorbían en esa época cerca de cien megatoneladas, es decir, casi siete veces más—. Un siglo después, el papel de los seres humanos y las plantas se había invertido. En 1990, la superficie de tierras cultivadas había aumentado a tal punto que la vegetación silvestre, cuya extracción de nitrógeno era de unas 89 megatoneladas, quedaba ya muy por debajo de la remoción de ese gas debida a las actividades humanas —como por ejemplo la agricultura y la ganadería o la producción de fertilizantes—, que se había elevado hasta alcanzar ya las 118 megatoneladas.

El impacto de nuestras sociedades en otros grandes mamíferos ha sido también muy profundo. En 1900, los mamíferos salvajes de hábitat terrestre representaban una biomasa de carbono equivalente a unas 10 megatoneladas. Los seres humanos suponían ya unas 13 megatoneladas, mientras que a los mamíferos domesticados (vacas, caballos, ovejas y cabras) podía atribuírseles la asombrosa cifra de 35 megatoneladas. En el siglo en el que estamos adentrándonos, estas cantidades experimentarán un vuelco todavía más acusado. En el año 2000, la biomasa total imputable a los mamíferos salvajes de hábitat terrestre había descendido a unas 5 megatoneladas, mientras que la de los seres humanos, que había experimentado un rapidísimo crecimiento (lo que no debe extrañarnos, dado lo que ya sabemos acerca del incremento demográfico), rondaba ya las 55 megatoneladas (con otras pasmosas 129 megatoneladas achacables a los mamíferos domesticados). Este indicador es muy elocuente: la

expansión de las actividades humanas, al absorber de la biosfera unas cantidades de recursos cada vez mayores, ha reducido en una medida muy importante la biomasa de otras especies de grandes mamíferos.

El argumento que se desprende de estos datos es de carácter general. Las cifras de población de la *mayoría* de animales y plantas que no poseen un valor inmediato para los seres humanos están disminuyendo. Y ese declive se está verificando con tantísima rapidez que hay quien especula que quizás estamos asistiendo a los prolegómenos de otro acontecimiento de extinciones generalizadas. La velocidad a la que se extinguen en la actualidad las especies animales no solo es varios cientos de veces superior a la registrada en los últimos millones de años sino que se acercan a unas tasas de desaparición que no se veían desde el último episodio de extinción masiva, ocurrido hace 65 millones de años. Hace ya mucho tiempo que los seres humanos nos las ingeniamos para poner a nuestros parientes más próximos al borde de la extinción, incluidos, probablemente, algunos de los miembros de la familia de los homininos, como los neandertales. En sus hábitats naturales, nuestros parientes vivos más cercanos (chimpancés, gorilas y orangutanes) se encuentran en inminente peligro de extinción.

Además, la revolución de los combustibles fósiles ha incrementado el alcance del impacto humano en otras muchas áreas. En nuestros días, la minería, la construcción de carreteras y la expansión de las ciudades moviliza un volumen de tierra mayor que el que desplazan la erosión y los procesos de glaciación juntos. Las bombas de motor diésel bombean el agua de los acuíferos a una velocidad diez veces superior a la de su reposición natural. Estamos produciendo minerales, rocas y formas materiales que jamás habían existido antes, como los plásticos (que, tras fabricarse a partir del petróleo, se acumulan actualmente en los vertederos, en las ciudades y en las aguas de los océanos), el aluminio puro o el acero inoxidable. Y no olvidemos que elaboramos también inmensas cantidades de cemento, una piedra artificial cuya fabricación es hoy

uno de los procesos que más contribuyen a las emisiones de carbono. La Tierra no había conocido una proliferación semejante de sustancias nuevas desde que apareciera una atmósfera principalmente compuesta de oxígeno, hace unos 2.400 millones de años.[7]

Uno de los cambios más aterradores es el asociado al incremento de la productividad armamentística. Hace solo unos cuantos siglos, las armas más letales que el género humano tenía a su disposición eran las lanzas, o quizá, las catapultas usadas para lanzar grandes piedras. A partir del período tardomedieval, la revolución de la pólvora, iniciada en China, acabó poniendo en nuestras manos mosquetes, rifles, cañones y granadas. La segunda guerra mundial difundió por el mundo un conjunto de armas capaces de degradar la totalidad de la biosfera en unas pocas horas, armas cuyo poder destructivo podría considerarse equiparable al del asteroide que borró del mapa a los dinosaurios.

¿Cómo evaluar los cambios registrados a lo largo del Antropoceno?

Los nuevos flujos de información y energía han establecido una estrecha vinculación entre los seres humanos, los animales y las plantas por un lado y las sustancias químicas presentes en la superficie terrestre, en los mares y en la atmósfera por otro, generando un sistema unificado cuya construcción obedece sobre todo a los intereses de nuestra propia especie. Este sistema depende del continuo uso de unos enormes flujos de energía procedentes de los combustibles fósiles. Las cifras que muestra el apéndice estadístico nos permitirán evaluar el impacto que esos flujos de energía han ido ejerciendo a lo largo del Antropoceno.

Lo primero que salta a la vista es la enorme magnitud del cambio registrado en los siglos más recientes. En los últimos doscientos años, las poblaciones humanas (columna B) han pasado de novecientos millones de individuos a más de seis mil millones. A ese

ritmo añadiríamos al planeta veintiséis mil millones de personas en mil años, lo que supone un ritmo de crecimiento mil veces más rápido que el experimentado en toda la era agraria (en la que, por término medio, la Tierra sumaba a su haber unos veinticinco millones de seres humanos por milenio). Estos índices de incremento demográfico son insostenibles, y de hecho en las últimas décadas han ido declinando. Con todo, las cifras ilustran el tremendo impacto que la revolución de los combustibles fósiles ha tenido en el crecimiento de la población.

El rápido ascenso del volumen demográfico ha venido de la mano del enorme desarrollo de la energía que nuestra especie tiene a su disposición (columna C). En los ocho mil años que median entre el fin de la última Edad de Hielo y el inicio de la era cristiana, el consumo de energía de los seres humanos se ha multiplicado aproximadamente por setenta. En solo doscientos años, de 1800 a 2000, el consumo total de energía ha aumentado cerca de veintidós veces, pasando de 20 millones de gigajulios (20 exajulios) a 52 millones de gigajulios (520 exajulios). Tal aumento equivale a un incremento de 2.500 exajulios cada mil años, lo que supone un ritmo de crecimiento veinte mil veces más rápido que el de la era agraria. Como ya ocurriera con la prosperidad derivada de la actividad agrícola y ganadera, la abundancia de energía conseguida mediante la explotación de los combustibles fósiles contribuyó a satisfacer las demandas asociadas con el crecimiento demográfico, a abonar los impuestos que la entropía exige a la complejidad y a sufragar, por último, el aumento del nivel de vida en general (aunque ahora a una escala mucho mayor que la de la era agraria). Y en esta ocasión, además, la mejora del confort existencial no se circunscribió a la décima parte de la población humana, sino que se extendió a un grupo emergente de dimensiones mucho mayores: la clase media.

Buena parte de la abundancia energética derivada del aprovechamiento de los combustibles fósiles ha servido para atender las necesidades del creciente número de seres humanos. Se ha utilizado para alimentar, vestir y alojar a los cinco o seis mil millones

de personas en que se ha cifrado el aumento de la población mundial en los últimos dos siglos. Sin embargo, la prosperidad lograda mediante los combustibles fósiles ha sido tan superior a la extraída de las actividades agrícolas y ganaderas que todavía ha sobrado una gran cantidad de energía para otros usos. Lo sabemos porque la columna D muestra que, en los últimos doscientos años, la energía disponible por persona se ha multiplicado casi por ocho, mientras que en los ocho mil años que median entre el fin de la última glaciación y el principio de la era cristiana ni siquiera llegó a duplicarse. En los dos últimos siglos, las poblaciones han crecido poco menos que a la velocidad de la luz (y aun así, el ritmo de crecimiento de los flujos de energía ha sido todavía mayor).

Un importante monto de la energía extra tuvo que dedicarse al pago de los impuestos que la entropía exige a las sociedades cuya complejidad aumenta. Y buena parte de esa energía no contribuyó a la realización de trabajos productivos o acabó disipándose en forma de calor, polución, deshechos o destrucción (como en el caso de las guerras). De esa energía improductiva se valió la entropía para llevar a cabo su tarea, consistente en degradar las estructuras complejas. No contamos con ninguna medición fiable de las cantidades de energía desperdiciadas en estos capítulos, pero han tenido que ser muy significativas. Y luego están los demás impuestos a la complejidad, es decir, los asociados con la energía y la riqueza dedicadas a crear las infraestructuras de las actuales sociedades globales. En los últimos doscientos años, el tamaño de las ciudades más voluminosas del planeta ha pasado de un millón de personas (un nivel demográfico que se ha mantenido casi estable en dos mil años) a más de veinte millones (columna F). Si consideramos por un momento las infraestructuras vinculadas con los tendidos eléctricos, el alcantarillado, las carreteras y los transportes públicos necesarios para dar vida a una ciudad moderna, y si a todo ello añadimos además los desafíos asociados con la gestión y la regulación de las actividades de veinte millones de individuos apiñados en una pequeña zona, podremos apreciar con claridad el salto cuántico que

esta situación supone en términos de complejidad social y tecnológica. Los gravámenes a la complejidad sufragan los montantes derivados de la construcción y el mantenimiento de los edificios, los autobuses, los trenes y los transbordadores, así como los vinculados con las redes de alcantarillado y carretera. Abonan también los que exige la recogida de basuras, las instalaciones eléctricas, los códigos jurídicos, los sistemas de control, las cárceles, los tribunales y las conexiones marítimas, aéreas, ferroviarias y electrónicas, pues todas ellas, incluidas las de Internet, permiten que las ciudades del mundo entero permanezcan unidas e integradas en una misma red. De no contar con este conjunto de sistemas diferenciados, cuyo movimiento depende en todos los casos del uso de enormes flujos de energía, las complejas estructuras de las ciudades modernas se desmoronarían enseguida. Y a su vez, las grandes urbes están unidas por una compleja estructura integrada por carreteras, leyes y comunicaciones electrónicas, con cientos de miles de asentamientos más pequeños, ya sean de pueblos, aldeas o emplazamientos aislados. Pese a no disponer de un modo fiable de medir su cuantía, podemos estar seguros de que los impuestos que gravan la complejidad se llevan buena parte de la energía que obtenemos de los combustibles fósiles.

Con todo, la plétora derivada de la explotación de los combustibles fósiles ha sido tan inmensa que aun después de tantos gastos quedaba todavía energía suficiente para la materialización de una tarea más: mejorar el bienestar de los seres humanos. Como ya había ocurrido en la era agraria, también ahora había una minúscula élite que consumía una cantidad de riqueza verdaderamente desproporcionada, así que, como en épocas pasadas, podemos asignar un porcentaje significativo de esa abundancia energética al consumo de un puñado de grupos acaudalados. Ahora bien, el incremento de energía fue tan descomunal que, por primera vez en la historia, los niveles de consumo empezaron a aumentar también en el ámbito de la igualmente creciente clase media, formada ya por varios miles de millones de personas, esto es, por un número de

individuos muy superior a la población total existente en el planeta a finales de la era agraria. El economista francés Thomas Piketty estima que, en los modernos países europeos, el 40 % de la población controla entre el 45 % y el 25 % de la riqueza nacional. La aparición de esta clase media ha sido un fenómeno nuevo en la historia humana. Además, ese reciente estamento social crece sin cesar, ya que las cifras de personas sumidas en la miseria declinan.

Paradójicamente, el aumento de la riqueza implica también un incremento de la desigualdad, y a pesar de que el número de individuos cuyo nivel de vida se halla por encima de la simple subsistencia esté creciendo, el volumen de personas que subsisten en la indigencia sigue siendo más elevado que en ningún otro período de la historia. Las valoraciones de Thomas Piketty le llevan a afirmar que, en la mayoría de los países actuales, el 10 % de la población más acaudalada controla entre el 25 % y el 60 % de la riqueza nacional, mientras que el 50 % menos afortunado apenas dispone de una franja situada entre el 15 % y el 30 % de ese patrimonio. Si comparamos estas cifras con las que existían justo antes de la primera guerra mundial, advertiremos que esto implica un declive de la desigualdad. Pero si nos fijamos en los porcentajes existentes en el arranque del siglo XXI, la desigualdad parece haber vuelto a entrar en una fase ascendente, lo que, añadido a la enorme cantidad de seres humanos que hoy puebla el planeta, nos lleva a concluir que, al menos en términos absolutos, existe hoy más gente inmersa en la pobreza más aguda que en épocas pasadas. En 2005 había más de tres mil millones de personas (más de los habitantes del planeta en 1900) obligadas a sobrevivir con menos de 2,5 dólares al día. La mayor parte de la gente que integra este inmenso grupo no solo ha disfrutado muy poco de los beneficios asociados con la revolución de los combustibles fósiles, sino que padece unas condiciones de vida insalubres, antihigiénicas y precarias muy similares a las que reinaban en los primeros tiempos de la revolución industrial y que tan vívidamente describieron Dickens y Engels.

No obstante, hay un creciente porcentaje de la población humana que no solo se beneficia del aumento de los flujos de energía y riqueza sino que está viviendo muy por encima de los valores de subsistencia. Estos flujos han hecho ascender los niveles de consumo y la cantidad y la calidad de la alimentación, así como el grado de salud, de miles de millones de personas. El índice que mejor refleja este cambio quizá sea el de la esperanza de vida (columna E). Durante la mayor parte de la historia humana, la esperanza de vida en el momento del nacimiento se situaba por debajo de los treinta años. Esto no se debía a que las personas no alcanzaran los sesenta o los setenta años, sino a que muchos niños fallecían a una edad muy temprana, y eran también numerosos los adultos que perecían como consecuencia de traumatismos e infecciones que hoy en día no habrían puesto su vida en peligro. En cien mil años, la esperanza de vida apenas experimentó cambio alguno. Y de repente, en el último siglo, la horquilla de la esperanza de vida se ha duplicado en casi todo el mundo. La causa hay que buscarla en el hecho de que los seres humanos hemos adquirido la información y los recursos necesarios para atender mucho mejor tanto a los más jóvenes como a los más ancianos; sin olvidar que también nos hemos dotado de la capacidad de alimentar a más personas y de mejorar los tratamientos y los cuidados que prodigamos a los enfermos y heridos.

El contraste entre la abundancia de energía que posibilitaron los combustibles fósiles y el muy inferior crecimiento que propiciaron las actividades agrícolas y ganaderas resulta asombroso. La bonanza energética que auspiciaron los combustibles fósiles fue tan inmensa que, además de los gastos asociados con la reproducción, las fortunas de las élites, los deshechos y las infraestructuras de la complejidad, todavía quedaba energía suficiente para elevar las cifras de consumo y los niveles de vida de un porcentaje de seres humanos cada vez mayor. Esto supuso una transformación revolucionaria. En su mayor parte, esa metamorfosis se ha

producido en los últimos cien años, y de hecho el grueso de su materialización se concretaría en la fase de Gran Aceleración de la segunda mitad del siglo xx.

Este es el amable rostro que presenta el Buen Antropoceno (bueno desde el punto de vista humano). El Buen Antropoceno ha permitido que varios miles de millones de seres humanos corrientes hayan podido tener una vida mejor, y esto por primera vez en la historia. (Si duda que efectivamente se haya producido tal mejora, recuerde lo ya apuntado acerca de una operación sin anestesia.)

Pero también hay un Antropoceno malo. El Mal Antropoceno se desglosa en los múltiples cambios que han acabado por poner en peligro los logros del Buen Antropoceno. En primer lugar, el Mal Antropoceno ha generado unas desigualdades enormes. Pese al colosal incremento de la riqueza, todavía hay millones de personas que viven en la más acuciante penuria. Y aun cuando resulta tentador pensar que el mundo moderno ha abolido la esclavitud, el índice global con el que se mide su incidencia en los distintos países del mundo señala en sus estimaciones que todavía existen en el mundo más de cuarenta y cinco millones de seres humanos que viven como esclavos. El Mal Antropoceno no es solo moralmente inaceptable, es también peligroso, pues constituye una garantía de conflicto, y en un planeta repleto de armas nucleares, toda gran hostilidad podría resultar catastrófica para buena parte de la humanidad.

El Mal Antropoceno amenaza también con reducir la biodiversidad y socavar un sistema climático que se ha mantenido estable en los últimos diez mil años. Los flujos de energía que sostienen el creciente consumo humano son en la actualidad tan enormes que las demás especies se están resintiendo, lo que pone en peligro los cimientos ecológicos sobre los que se levanta el edificio de la sociedad moderna. En el pasado, los mineros que explotaban las vetas de carbón bajaban a los pozos con un canario para detectar si los niveles de dióxido de carbono eran peligrosos. En nuestros días, tanto el incremento de la concentración de ese gas

en la atmósfera como el declive de la biodiversidad y el deshielo de los glaciares constituyen otras tantas advertencias de que está cuajando un proceso peligroso, y deberíamos tomarnos muy en serio el aviso.

El reto al que nos enfrentamos como especie es muy claro. ¿Seremos capaces de conservar los mejores aspectos del Buen Antropoceno y evitar al mismo tiempo los peligros del Mal Antropoceno? ¿Sabremos distribuir de un modo más equitativo la abundancia de energía y recursos del Antropoceno para evitar cualquier conflicto de horizonte catastrófico? ¿Aprenderemos a utilizar un conjunto de flujos de recursos más apacible para conseguirlo, como en su día hicieron los primeros seres vivos? ¿Acertaremos a encontrar algún equivalente global de las sutiles bombas de protones que hoy constituyen la fuente de energía de todas las células vivas? ¿O seguiremos dependiendo de unos flujos de energía y recursos enormes, cuya explotación nos aboque, en último término, a la destrucción de la formidable complejidad de las sociedades que hemos levantado en los últimos doscientos años?

CUARTA PARTE

EL FUTURO

Capítulo 12

¿Y ADÓNDE NOS LLEVA TODO ESTO?

> «Es difícil hacer predicciones, sobre todo para imaginar el futuro.»
>
> Atribuido a Yogui Berra

> «Hace ya mucho tiempo que el hombre ha echado en el olvido que la Tierra le fue dada solo en usufructo, no para su consumo, y menos todavía para un despilfarro pura y simplemente disoluto.»
>
> Charles Perkins Marsh, *Man and Nature*

Los retos del futuro

En la introducción del presente libro contemplamos el abigarrado y fantástico galope de todo lo existente, con sus estrellas y sus serpientes, sus cuarks y sus teléfonos móviles, en un variopinto desfile amenizado por el lejano retumbar de las supernovas y el impávido pero exhaustivo examen de la entropía. Ahora bien, ¿adónde se dirige semejante cabalgata?

Curiosamente, muy pocos sistemas educativos contemporáneos dedican algún tiempo a divulgar enseñanzas capaces de abordar con sistematicidad el futuro. Esta negligencia resulta sorprendente, pues si hay algo que hacen todos los organismos cordados es precisamente pensar en el futuro, y de hecho, los seres humanos lo hacemos mejor que cualquier otra especie. El cerebro, ya sea el de un humano o el de un chimpancé, se dedica siempre a crear

modelos simplificados del mundo en su estado presente, pero también genera esquemas de los cambios que podría experimentar el entorno. Al igual que los corredores de bolsa y los climatólogos, los cerebros viven de establecer modelos del futuro. Y al hacerlo, avisan a sus portadores de la aproximación de una posibilidad o de un peligro.

En la actualidad, los seres humanos poseemos unas habilidades fantásticas para realizar proyecciones de futuro de formidable alcance. Y si tenemos la capacidad de generar modelos sumamente detallados y exactos del porvenir se debe a que nuestro lenguaje, unido a la facultad de compartir información, nos permite combinar miles de millones de posibilidades diferentes. Esto hace posible refinar, enriquecer y mejorar nuestras plantillas, puesto que las críticas y las nuevas informaciones derivadas de la actividad de miles de millones de seres humanos, en el transcurso de incontables generaciones, nos permiten añadirles datos, pinceladas y correcciones. En nuestros días, los modelos del mundo incluyen informaciones procedentes de todos los rincones del planeta Tierra. Para elaborarlos disponemos de las mejores averiguaciones de la ciencia contemporánea, que luego procesamos en redes de ordenadores capaces de estudiar millones de escenarios diferentes. «Si todos los glaciares de Groenlandia se derriten, ¿ascenderá el nivel de los océanos hasta el punto de sumergir ciudades como Miami y Daca?» Hace cien años habría sido imposible plantear siquiera una pregunta semejante. Hoy en cambio, las respuestas, ampliamente matizadas y comprobadas con todo cuidado, que reciben este tipo de cuestiones pueden orientar la adopción de unas medidas políticas destinadas a afectar a millones de personas, muchas de las cuales son hoy muy jóvenes o ni siquiera han nacido todavía. (Y sí, en efecto, Miami y Daca terminarán bajo las aguas.)

También podemos intentar hallar respuesta a otras incógnitas de mayor trascendencia sobre situaciones de un futuro muy, muy lejano. Por ejemplo: «¿Terminará venciendo la entropía? ¿Acabará demoliendo *todas* las estructuras y formas?». Se da la circunstancia

de que disponemos de unas cuantas respuestas a estas pesquisas, y bastante firmes, porque lo que intentamos saber remite a un tipo de cambios que, a escala cosmológica, resultan relativamente simples. Volvemos a vernos las caras con los complejos sistemas físicos del universo primitivo. Las respuestas a las preguntas que buscan abrir una ventana al futuro cosmológico no pueden ofrecernos una guía práctica muy clara para el presente, debido precisamente al hecho de que guardan relación con acontecimientos tremendamente remotos. Aun así, lo que pueden hacer es moldear nuestra historia moderna de los orígenes, puesto que, al brindarnos pistas sobre el posible rumbo de los acontecimientos, estimulan nuestra voluntad de seguir investigando. Con suerte, nos permiten acceder a un conocimiento profundo, pueden imbuirnos incluso de un cierto sentimiento de finalidad, pero no son capaces de indicarnos ninguna vía de acción.

Sin embargo, entre la escala temporal del individuo y la del cosmos se interpone una tercera que se extiende unos cuantos miles de años. ¿Qué aspecto tendrá la Tierra en un par de milenios? Y por cierto, ¿cómo seremos entonces los seres humanos? ¿Plantaremos maíz en Marte, levantaremos colonias o ciudades en ese planeta?[1] Curiosamente, esta escala temporal intermedia es la más difícil de modelizar. En esta franja de tiempo, las preguntas de mayor interés remiten siempre a una serie de sistemas de inconcebible complejidad, como ocurre por ejemplo con la biosfera, y en dos mil años, la ramificación de las posibilidades habrá adquirido tañ frondosidad que ni siquiera los ordenadores más potentes son capaces de señalar cuál es el escenario más probable. Pero lo que nos bloquea no es solo el número de bifurcaciones. Como ha mostrado la física cuántica, cuando nos movemos en las escalas más pequeñas, el universo no es determinista. Ocurren *de facto* cosas inesperadas, y como ya vimos en el caso del aleteo de una mariposa, la realidad más ínfima puede poner en marcha una cascada de cadenas causales lo bastante potente para provocar que el abanico de eventualidades futuras se expanda en múltiples

direcciones. Esto significa que hay un amplísimo margen para la simple y llana intervención de esas viejas conocidas que son las contingencias. Ni nuestros cerebros ni los mejores modelos informáticos actuales son capaces de calcular la totalidad de los factores que determinan el curso de una pandemia provocada por la minúscula mutación genética de un virus ni las repercusiones que pudiera tener la explosión de una supernova cercana, aunque tal vez no estemos lejos de predecir el posible impacto de un asteroide (y a cualquier dinosaurio le habría encantado tener ese conocimiento). Esta escala intermedia es la puerta por la que accedemos al reino de la ciencia ficción. Los relatos que elaboramos sobre los escenarios de los próximos milenios resultan tan fascinantes como evocadores, y desde luego no hay que desdeñarlos. Pero no hay forma de decidir cuál de ellos merece ser tomado seriamente en cuenta.

El futuro de la humanidad: la misión que tenemos por delante

Para los seres humanos, los próximos siglos son verdaderamente relevantes. Los acontecimientos se están precipitando a tal velocidad que, como sucede con la ralentización del tiempo que experimentamos cuando nos libramos por los pelos de un accidente, los detalles de lo que hagamos en las próximas décadas tendrán consecuencias de enorme calado tanto para nosotros como para la biosfera; consecuencias que, además, se prolongarán durante varios miles de años. Nos guste o no, hoy estamos gestionando la realidad de toda la biosfera, y podemos hacerlo bien o mal.

Existen toda clase de mitos que pueden enseñarnos muchas cosas inestimables para afrontar un futuro impredecible, pues están repletos de historias sobre actos que estuvieron a punto de fracasar, fallos catastróficos y búsquedas que alcanzaron su objetivo. La novedad hoy es la posibilidad de un desastre que afecte a siete mil millones de personas y provoque daños colaterales en millones de seres vivos que, además de no pertenecer a nuestra especie, se

verían convertidos en víctimas por el mero hecho de vivir en un planeta mal regido. Por consiguiente, los seres humanos actuales —como los héroes y heroínas de todo mito que se precie— tienen ante sí una tarea inexorable. La labor que debemos llevar a cabo consiste en evitar el descalabro y llevar al planeta a buen puerto, para que tanto el género humano como el resto de la biosfera puedan vivir dignamente (dado que sabemos que en una biosfera arruinada tampoco nosotros podríamos llevar una existencia satisfactoria).

Los mejores mitos comparten una característica: no ofrecen garantías de éxito. La posibilidad de que nos estrellemos es perfectamente real. Podríamos revelarnos torpes en el manejo de la intrincada maquinaria global que nosotros mismos hemos construido y quedarnos sin los beneficios del Buen Antropoceno. Las probabilidades de que este sombrío horizonte se materialice aumentan si los maquinistas al mando del vehículo tratan de orientarlo en distintas direcciones, y lo mismo cabe decir si los pilotos hacen caso omiso de las luces rojas que aparecen en sus paneles de control. Si la máquina se descompone y la productividad se desploma, seremos incapaces de atender las necesidades de siete mil millones de personas. Nos enfrentaríamos entonces a un tenebroso período presidido por el caos social, las guerras, la hambruna y las enfermedades desbocadas. En eso vendría a concretarse la «ley del más fuerte» del *Artha-shastra*. Finalmente, cuando la situación acabara de asentarse (suponiendo que se calmara), nos encontraríamos en un escenario en el que un número de supervivientes muy inferior a la población anterior a la debacle tendría que volver a vivir ciñéndose a los límites impuestos por la era agraria, en un mundo en el que solo una minúscula minoría podría disfrutar de algo más que la descarnada subsistencia. Si dañamos gravemente los sistemas climáticos, ni siquiera la agricultura resultará viable en buena parte del mundo que heredemos. A fin de cuentas, las actividades agrícolas y ganaderas dependen de que persistan los climas equilibrados del Holoceno.

Por consiguiente, ¿cómo saber lo que pasará? Como aventuran algunos relatos de ciencia ficción, quizá las poblaciones humanas que consigan sobrevivir logren reconstruir poco a poco un mundo similar al que ahora tenemos, valiéndose quizá de sus recuerdos y de los chamuscados libros y manuscritos que se salven, o incluso de los deteriorados vestigios de las ciudades, fábricas, máquinas y microchips que rescaten. Pero ¿tendrán razón las voces que sugieren que la complejidad que los seres humanos somos capaces de gestionar no es ilimitada? ¿Habremos llegado a un nivel de complejidad que nos supera? ¿Están acaso abocadas todas las especies capaces de acceder al aprendizaje colectivo a chocar contra un muro de complejidad más allá del cual solo pueden asistir al desmoronamiento de sus sociedades? ¿Es esa la razón de que nunca hayamos podido contactar con ninguna otra especie dotada de esa misma facultad de aprender de forma colectiva? En los mitos griegos, los dioses castigan a Sísifo, rey de Corinto, tanto por su exceso de ambición como por intentar superarlos en astucia. Advertidos, presumiblemente, por la entropía, los olímpicos le condenaron a empujar una piedra enorme por la empinada ladera de una montaña para verla rodar cuesta abajo cuando ya creyera estar a punto de alcanzar la cima, y esto por los siglos de los siglos.

Todos estos escenarios resultan deprimentes, pero no podemos pasarlos por alto. Nuestro destino le es por completo indiferente al universo. Este es un vasto océano de energía para el que las olitas individuales como nosotros son puros sucesos efímeros, meros fenómenos pasajeros. Como señala el profesor de literatura estadounidense Joseph Campbell: «La cruda severidad [de todos los grandes mitos] encuentra su contrapunto en la seguridad de que todo cuanto vemos no es sino el reflejo de un poder que perdura, inaccesible al dolor. Por eso los relatos que transmite son, además de inmisericordes, incapaces de provocar terror, pues están impregnados de la dicha de un anonimato transcendente que se contempla a sí mismo en la totalidad de egocéntricos yoes en

disputa cuya sucesión de nacimientos y muertes enguirnalda el tiempo».[2] La ciencia moderna expresa esa terrible indiferencia del universo en la primera y la segunda leyes de la termodinámica.

Sin embargo, pese a esa indiferencia del universo, los seres humanos, como todos los organismos vivos, concebimos objetivos y nos embarcamos en larguísimos viajes para materializarlos,. De hecho, los relatos de todas las culturas son en realidad descripciones de esos periplos, aunque nos indiquen que unas veces salen bien y otras no. Los expedicionarios pasan por etapas en las que todo parece perdido, períodos marcados por tremendas penalidades. A veces, sus pesquisas y sus metas se ven de pronto interrumpidas. Pero también aparecen elementos que les tienden la mano, sean dioses o amigos. Y hay asimismo golpes de suerte. Por consiguiente, en todas las tradiciones mitológicas, las misiones de búsqueda y exploración pueden verse coronadas por el éxito (y así ocurre en muchas ocasiones). Las virtudes principales que necesita quien se aventure en un viaje existencial de magnitudes colectivas se resumen en la capacidad de mantenerse alerta, de conservar la determinación y de no perder nunca la esperanza. El viajero que deja escapar las ocasiones que se le presentan, que abandona prematuramente, o que cae en la desesperación, acaba fracasando irremisiblemente. Cualquier fabulista tradicional habría podido confirmarnos que esas son las cualidades que los seres humanos deberemos mostrar para hacer frente a un futuro impredecible saturado de peligros y oportunidades.

El debate surgido a raíz del contraste entre el Antropoceno Bueno y el Malo señala cuáles son los objetivos que en la actualidad debe perseguir el género humano. El primero es evitar la hecatombe. Si conseguimos hacerlo nos veremos ante otras dos metas: conseguir que las ventajas del Buen Antropoceno lleguen a todos los seres humanos, y asegurarnos de que la biosfera continúe prosperando, puesto que, si la biosfera se malogra, no habrá misión que cumplir. El reto que debemos afrontar consiste en concretar esos objetivos,

aun cuando a menudo su consecución parezca llevarnos en direcciones divergentes, como si unas veces hubiera que fomentar la complacencia y otras la moderación.

Para que lo que acabo de exponer no parezca grandilocuente en exceso, véase cómo se detallan las características de la aventura humana en el documento incluido en el preámbulo de las Naciones Unidas bajo el epígrafe «Transformar nuestro mundo», publicado en 2015:

> Este plan será implementado por todos los países y partes interesadas mediante una alianza de colaboración. Estamos resueltos a liberar a la humanidad de la tiranía de la pobreza y las privaciones y a sanar y proteger nuestro planeta. Estamos decididos a tomar las medidas audaces y transformativas que se necesitan urgentemente para reconducir al mundo por el camino de la sostenibilidad y la resiliencia. Al emprender juntos este viaje, prometemos que nadie se quedará atrás.

Y prosigue más adelante:

> Las personas: Estamos decididos a poner fin a la pobreza y el hambre en todas sus formas y dimensiones, y a velar por que todos los seres humanos puedan realizar su potencial con dignidad e igualdad y en un medio ambiente saludable.
>
> El planeta: Estamos decididos a proteger el planeta contra la degradación, incluso mediante el consumo y la producción sostenibles, la gestión sostenible de sus recursos naturales y la adopción de medidas urgentes para hacer frente al cambio climático, de manera que pueda satisfacer las necesidades de las generaciones presentes y futuras.
>
> La prosperidad: Estamos decididos a velar por que todos los seres humanos puedan disfrutar de una vida próspera y plena, y para que el progreso económico, social y tecnológico se produzca en armonía con la naturaleza.*

Seguidamente se desgranan 17 objetivos de desarrollo sostenible y 169 metas específicas a realizar, si todo va bien, en los próximos quince años.

No es fácil reprimir el escepticismo, y en este caso tiene sentido enfocar el asunto con un cierto cinismo. No obstante, para alguien que creció a mediados del siglo xx, es decir, en una época en la que apenas se entendían los peligros del Mal Antropoceno, no deja de resultar notable que un organismo que representa a la mayor parte de los países del planeta haya redactado semejantes declaraciones.

Poco después de publicarse los objetivos de desarrollo sostenible aparecía otro documento notable: el Acuerdo de París sobre el Cambio Climático. Este histórico texto se adoptó el 12 de diciembre de 2015, en una Conferencia de las Naciones Unidas en la que participaron 195 países. Entró en vigor el 4 de noviembre de 2016, en cuanto el número de estados que lo ratificaron formalmente alcanzó el *quorum* suficiente. Lo que se propone es lo siguiente:

a) Mantener el aumento de la temperatura media mundial muy por debajo de 2 ºC con respecto a los niveles preindustriales, y proseguir los esfuerzos para limitar ese aumento de la temperatura a 1,5 ºC con respecto a los niveles preindustriales, reconociendo que ello reduciría considerablemente los riesgos y los efectos del cambio climático.
b) Aumentar la capacidad de adaptación a los efectos adversos del cambio climático y promover la resiliencia al clima y un desarrollo con bajas emisiones de gases de efecto invernadero, de un modo que no comprometa la producción de alimentos.
c) Situar los flujos financieros en un nivel compatible con una trayectoria que conduzca a un desarrollo resiliente al clima y con bajas emisiones de gases de efecto invernadero.**

La tensión existente entre estos dos documentos refleja muchas de las dificultades inherentes a la procura de un mundo mejor, pues lo cierto es que no está claro que en realidad sea posible ajustar las emisiones de dióxido de carbono a los niveles declarados sin una drástica reducción del uso de los combustibles fósiles. ¿Es compatible esa disminución con un crecimiento sostenible? Tal vez

sí, suponiendo que la producción de energías renovables crezca con la suficiente velocidad. Sin embargo, podemos estar razonablemente seguros de que la tarea resultaría más sencilla si hubiera un mayor compromiso con la redistribución de riqueza y una mejor disposición a aceptar que los ritmos de crecimiento económico se ralenticen un poco.

Nuestra historia moderna de los orígenes sugiere una analogía útil: la de las energías de activación químicas. Las energías de activación químicas proporcionan el impulso inicial con el que se desencadenan las reacciones químicas vitales y las mantienen en funcionamiento. Sin embargo, una vez se han puesto en marcha, esas reacciones no necesitan ya tanta energía para continuar. En este sentido, quizá quepa la posibilidad de considerar que los combustibles fósiles han sido la energía de activación precisa para lograr que arrancara la situación actual, pero ahora que este mundo tan nuevo y satinado ha echado a andar, ¿sabremos conseguir que siga operando mediante la inyección de unos flujos de energía más pequeños y sutiles, como los minúsculos caudales que gestionan las enzimas, electrón a electrón, o protón a protón, y que aportan la energía de las células vivas? ¿Seremos capaces de imitar la respiración, ese delicado mecanismo que anima a los seres vivos de gran tamaño y que viene a ser una especie de contrapunto inocuo del fuego?

La idea de que los combustibles fósiles hayan constituido la energía de activación de nuestra civilización también apunta a otra de las características del mundo contemporáneo. El turbulento dinamismo de los últimos siglos es característico de todos los períodos marcados por un proceso de destrucción creativa. Viene a ser el equivalente humano de las energías gravitacionales que dieron lugar al surgimiento de las estrellas. Sin embargo, una vez que las violentas energías de creación han hecho su trabajo, lo que cabe esperar es la instalación de un dinamismo nuevo y más estable, dado que una realidad nueva ha tomado acomodo en el universo. Del mismo modo que ha hecho nuestro sol, quizá también nosotros

podamos asentarnos y vivir un largo período de estabilidad dinámica una vez franqueado este último umbral, y a lo mejor eso nos permite edificar una sociedad mundial nunca vista que sepa preservar lo mejor del Buen Antropoceno. Quizá la idea de un crecimiento indefinido sea un craso error. Tal vez el perturbador dinamismo de los pasados siglos no sea más que un fenómeno temporal. A fin de cuentas, durante la mayor parte de la historia humana, y lo mismo vale para casi todas las sociedades de nuestra especie, lo normal ha sido vivir en un marco de estabilidad social y cultural. Y esta es la razón de que la comprensión de lo que significa vivir con dinamismo en la abundancia, y en un mundo menos mudable, sea una noción que muchas de las culturas indígenas modernas han sabido preservar, dado que sus integrantes se ven a sí mismos como custodios de un mundo más vasto y más antiguo que su propia especie.

Pese a que en la actualidad no sea un planteamiento en boga, lo cierto es que en los debates que mantienen los economistas de mentalidad filosófica suele aparecer con regularidad la idea de un futuro en el que la obsesión del continuo crecimiento haya desaparecido. En el siglo XIX, muchos estudiosos de la economía, entre ellos Adam Smith, contemplaron con temor la eventualidad de un futuro sin crecimiento, pues consideraban que semejante situación así significaría el fin del progreso. Sin embargo, John Stuart Mill saludaba con júbilo ese porvenir, ya que lo veía como un alentador contrapunto al frenético y enfebrecido mundo de la revolución industrial. En 1848 escribía, por ejemplo: «Confieso que no me agrada el ideal de vida que defienden aquellos que creen que el estado normal de los seres humanos es una lucha por avanzar; y que el pisotear, dar codazos y pisarle los talones quien va delante, que son característicos del tipo actual de vida social, constituyen el género de vida más deseable para la especie humana; para mí no son otra cosa que síntomas desagradables de una de las fases del progreso industrial».[3]

Y como alternativa a esa situación argumentaba: «El mejor estado para un ser de naturaleza humana es aquel en el que, no viviendo nadie en la pobreza, no haya nadie que ansíe más riquezas ni tenga razón alguna para temer que su situación revierta como consecuencia de los esfuerzos de quienes luchan por ascender en la escala social». Según afirmaba, el crecimiento seguía siendo necesario en muchos países atrasados, pero en las naciones opulentas lo que se necesitaba era más bien una mejor distribución de la riqueza. Una vez atendidas las necesidades básicas, la tarea de los ciudadanos de esos estados afortunados se centraba antes en vivir de un modo más pleno que en continuar adquiriendo sin cesar nuevas riquezas materiales.

> Apenas es necesario señalar que una condición estacionaria del capital y la población no implica un estadio estacionario de la mejora humana. Habría tantas posibilidades como siempre para todo tipo de cultura intelectual, para el avance moral y el progreso social; tanto espacio como antes para optimizar el arte de vivir, y muchas más probabilidades de que este mejore aún más, si la mente deja de concentrarse en el arte de medrar.*

Mill nos advierte de que la instauración del estado estacionario debe ser una situación que se promueva de forma deliberada, desde la prosperidad y de forma pacífica, antes de que la humanidad se vea forzada a adoptarla a regañadientes y por medios mucho menos agradables: «Espero sinceramente, por el bien de la posteridad, que [las sociedades ricas] se contenten con ser estacionarias mucho antes de que la necesidad les obligue a ello».

Otros muchos autores han comprendido que el crecimiento económico no es sinónimo de vida buena. En 1930, en un ensayo titulado «Posibilidades económicas de nuestros nietos», el economista británico John Maynard Keynes sostenía que en el breve plazo de un siglo la productividad habría alcanzado ya unos niveles lo suficientemente elevados para atender con garantías las necesidades existenciales de todo el mundo. En ese texto, Keynes expresaba su esperanza de que, llegado ese momento, la gente

dejara de trabajar con tanto ahínco y comenzara a pensar más en mejorar su calidad de vida. Y en marzo de 1968, justo antes de caer asesinado, Robert Kennedy denunciaba las limitaciones de una economía consagrada al crecimiento infinito del producto interior bruto:

> Nuestro producto interior bruto tiene en cuenta, en sus cálculos, la contaminación atmosférica, la publicidad de los cigarrillos y el recorrido de las ambulancias que recogen los heridos de nuestras carreteras. [...]. Incluye la destrucción de las secoyas y la pérdida de las maravillas de nuestra naturaleza, provocadas por nuestro caótico desarrollismo. [...]. Sin embargo, el producto interior bruto no refleja la salud de nuestros hijos, la calidad de su educación ni el júbilo de sus juegos. No contempla la belleza de nuestra poesía [...], la inteligencia de nuestros debates públicos ni la integridad de nuestros funcionarios públicos. [...] En resumen, el producto interior bruto lo mide todo menos aquello por lo que merece la pena vivir.

La creciente comprensión que estamos alcanzando de la biosfera nos indica a las claras cuáles son las razones que hacen imprescindible tratarla de un modo más amable. ¿Qué grado de resiliencia tiene a fin de cuentas el mundo de lo vivo? No lo sabemos. Quizás existan puntos de inflexión capaces de acelerar los cambios perjudiciales debido a que desencadenan la puesta en marcha de un peligroso conjunto de bucles de retroalimentación positiva. Los glaciares, por ejemplo, como los que cubren la práctica totalidad de Groenlandia, reflejan la luz del sol. Si se derriten, la superficie de esa región se volverá más oscura y comenzará a absorber calor en lugar de devolverlo al aire por irradiación. Esto incrementa la cantidad de calor acumulado en la atmósfera, con lo que se deshelarán más glaciares, se reducirá la reflectividad de la Tierra y se acentuará aún más el calentamiento generalizado. Este tipo de mecanismos nos avisan de que es preciso reflexionar muy seriamente acerca de las limitaciones de la biosfera.

El Centro de Resiliencia de Estocolmo lleva muchos años trabajando en la identificación de los «límites planetarios»: aquellos que la humanidad no puede sobrepasar sin poner en grave peligro

su propio futuro.[4] Esta institución ha señalado nueve límites cruciales y subrayado el carácter crítico de dos de ellos (el cambio climático y la mengua de la biodiversidad), pues si se rebasan gravemente las capacidades de adaptación de uno u otro, la totalidad de la biosfera podría superar las barreras de toda posible estabilidad.[5] Por supuesto, la modelización de los cambios que puedan producirse a escala global está todavía en mantillas y se basa parcialmente en deducciones. Cuando cruzamos esos peligrosos límites no suena ninguna sirena de alarma que confirme nuestras predicciones. Sin embargo, con la debida cautela, los investigadores del Centro de Resiliencia de Estocolmo han llegado a la conclusión de que ya hemos rebasado de un modo categórico la frontera planetaria de la biodiversidad y de que estamos acercándonos a los límites del cambio climático. Lo que nos ha llevado a rebasar esas críticas líneas divisorias ha sido el impacto que ejercemos en los flujos de fósforo y nitrógeno, y también estamos cerca de penetrar en la zona peligrosa de la utilización de la tierra, sobre todo por lo que hace a la explotación los bosques. Estamos empezando a ver luces de alarma en los paneles de control de la maquinaria global que nosotros mismos hemos construido.

Si a pesar de todos los desafíos, los seres humanos conseguimos salir adelante y continuar con nuestra búsqueda, ¿qué aspecto tendrá un eventual «Antropoceno maduro»?[6] Por supuesto, no será un mundo perfecto; pero es importante que intentemos imaginar ese mundo mientras nos esforzamos en alumbrarlo. Hay tantísimos imponderables en este caso que no podemos esbozar un solo plano arquitectónico. No obstante, lo que sí podemos hacer es señalar con detalle parte de las características fundamentales de un mundo capaz de conservar lo mejor del Buen Antropoceno y de evitar al mismo tiempo los peligros del Mal Antropoceno.

En ese mundo, el incremento de la población irá descendiendo lentamente hasta llegar en último término a cero, para comenzar quizá a descender. Los índices de crecimiento demográfico ya están cayendo en muchas regiones del planeta, y en algunas regiones las

cifras de población humana ya han empezado a menguar. Hay un gran número de medidas que pueden acelerar este proceso, y de entre ellas destacan por ejemplo la procura de una mejor atención sanitaria a las familias pobres y una educación de mayor calidad a las mujeres y las niñas de los países en peor situación económica. No son pocos los economistas que advierten de los peligros vinculados con una ralentización del crecimiento demográfico, pero si consideramos las cosas desde el punto de vista de la biosfera veremos que el crecimiento continuado de la población es simplemente insostenible. En un Antropoceno maduro, la pobreza habrá sido eliminada en gran medida mediante la instauración de mejores sistemas de bienestar y la imposición de límites y controles a la acumulación extrema de riqueza. Como ya hemos visto, la pobreza aguda ya ha empezado a descender, en términos relativos, en buena parte del mundo. Al final, a medida que el crecimiento económico vaya dejando de constituir el objetivo primordial de los gobiernos, los individuos comenzarán a valorar más la calidad de su vida y su ocio que el aumento de sus ingresos. Con el respaldo de los gobiernos, cada vez habrá más gente que pierda el interés en seguir el desenfrenado ritmo de las formas más extremas de competitividad convulsa. La satisfacción de las necesidades de estas personas se convertirá en un estímulo para los sectores económicos dedicados más a proporcionar servicios que a fabricar bienes materiales. La educación y la ciencia adquirirán una mayor importancia a ojos de los gobiernos, puesto que poco a poco el conocimiento irá sustituyendo a los objetos materiales como fuente de riqueza y bienestar. Y las ideas también experimentarán cambios, sobre todo en el caso de las que nos indican en qué consiste una vida buena y cuáles han de ser los objetivos de un buen gobierno.

En algún momento de este mismo siglo, las economías mundiales se librarán de los combustibles fósiles. La producción de energías renovables ya está aumentando a toda velocidad, así que no se trata de ninguna meta irreal, aunque su consecución exigirá que los gobiernos intervengan con más vigor del que ahora emplean. Si esta

liberación de los combustibles fósiles va unida a la adopción de medidas destinadas a captar el dióxido de carbono de la atmósfera, se logrará modificar el régimen energético mundial, lo cual podría limitar el calentamiento global y situarlo en solo dos grados Celsius por encima de los niveles preindustriales. La creciente eficacia que se ha conseguido tanto en la utilización de la energía como en el aprovechamiento de los materiales acabará por reducir el consumo energético *total*, y por otra parte, el reciclado de los materiales ya existentes disminuirá la extracción de nuevos minerales y recursos hasta conseguir que sea prácticamente nula.

Las innovaciones y los cambios de las pautas de consumo serán una de las facetas de una transformación más amplia que hará que la actividad agrícola demande menos recursos y consiga una mayor eficiencia. En este sentido, no hay duda de que la innovación científica deberá desempeñar un enorme papel. Se invertirán grandes sumas en proteger la biodiversidad, los humedales y las regiones frágiles, como por ejemplo los arrecifes de coral o las vastas extensiones de la tundra.

Como ya señaló John Stuart Mill, un planeta más estable no tiene por qué ser un mundo estático. De hecho, una humanidad de ese tipo ofrecerá toda clase de oportunidades al surgimiento de nuevas formas artísticas, ampliará y fomentará las relaciones sociales e incentivará la aparición de todo un conjunto de formas novedosas y menos manipulativas de relacionarse con el universo natural. En este sentido, las sociedades modernas tienen mucho que aprender de quienes supieron preservar las tradiciones del pasado, es decir, de las sociedades que han sabido vivir miles de años en una relación estable con su entorno. ¿Sería poco razonable abrigar la esperanza de que en ese mundo pueda aumentar la calidad de vida de un gran número de personas, sin necesidad de seguir incrementando el consumo medio de recursos?

Ya están despuntando muchas de las condiciones Ricitos de Oro que pueden permitirnos superar este nuevo umbral. Entre ellas se cuentan el portentoso patrimonio intelectual de la erudición científica

moderna, el hecho de que hoy comprendamos mucho mejor cómo opera la biosfera y la creciente conciencia de que nuestro destino como seres humanos va íntimamente unido a nuestra única casa: el planeta Tierra. Aun así, para motivarnos a la acción y poder tomar medidas en el presente también necesitaremos las vívidas imágenes de un futuro mejor. A fin de cuentas, la esperanza es una virtud crucial cuando se intenta construir un mundo mejor, y lo mismo podemos decir de una lúcida actitud vigilante (y aquí nos ayudará disponer de la máxima cantidad posible de ciencia sensata) y de la determinación (terreno en el que la política deberá desempeñar un papel crucial).

En el momento en que escribo estas líneas, avanzado el año 2017, la determinación es la virtud que más se echa en falta. Resulta notable que los gobiernos de todo el mundo defiendan hoy, al menos de palabra, la puesta en práctica de un conjunto de proyectos similares al de la misión general que acabo de exponer aquí. Sin embargo, no existe aún un sólido consenso global sobre la tarea en sí. Muchos políticos siguen convencidos de que las luces de alarma que parpadean en nuestros paneles de control se deben a la existencia de interruptores o conexiones desajustadas y a una mala praxis científica. Y muy pocos se toman la molestia de pensar en la magnitud del campo de visión que es preciso abarcar para imaginar seriamente las características del futuro próximo. La mayor parte de la gente, y en particular la sumida en situaciones de pobreza grave, tiene que concentrar toda su atención en las necesidades y objetivos que le salen individualmente al paso. En la mayoría de los casos, los políticos y los empresarios también deben centrarse en cuestiones de carácter más inmediato. Los gobiernos ciñen su acción a sus respectivos ámbitos nacionales y además compiten entre sí, lo que significa que la riqueza y el poder de los países tiende a pesar mucho más en los cálculos políticos que las exigencias del mundo en su conjunto. Los propios métodos con los que se designa o elige a los altos funcionarios gubernamentales hacen que la mayor parte de los gobiernos limiten su radio de acción a la conquista de metas a

corto plazo. Pocos hombres de estado son capaces de establecer con firmeza uno o más objetivos realistas a veinte o treinta años vista, y sin embargo esos son justamente los marcos temporales que decidirán los resultados de la búsqueda de un mundo mejor. Por último, en un planeta regido por los principios capitalistas, la mayor parte de las empresas obedecen a la necesidad de obtener beneficios, y en el momento actual la consecución de esas ganancias suele orientarse demasiado a menudo en una dirección diferente a la que debiera tomarse si de veras se pretende alcanzar la sostenibilidad.

Por consiguiente, ¿qué posibilidades hay de que surja un consenso global en torno a la relevancia de las metas que he señalado? Uno de los signos más esperanzadores es la velocidad a la que se ha llegado a un diagnóstico coincidente en la esfera científica, como queda reflejado en documentos como el de los objetivos de sostenibilidad de las Naciones Unidas o el rubricado en los acuerdos de París sobre el cambio climático. Hace treinta años, este tipo de declaraciones habrían resultado impensables. Además, es posible que estemos cerca de un punto de inflexión económico en el que las metas mismas que aquí sugerimos empiecen a resultar rentables y compatibles con la evolución del capitalismo global. En tal caso, las colosales energías innovadoras y comerciales del capitalismo moderno, y el no menos formidable poder de los ejecutivos que dependen de la riqueza que genera ese capitalismo, podrían sumarse al empeño y proporcionarle un impulso parecido al que imprimieron los gobiernos capitalistas al proceso de la revolución industrial. Ahora bien, en el mundo de hoy, bastante más complejo que el de antes, el comportamiento de los gobiernos dependerá, al menos en parte, de que existan votantes capaces de tomarse en serio el proyecto mismo. Y eso a su vez se hallará vinculado en cierta medida a las dotes de persuasión de la gente decidida a describir las características de la misión que deseamos ver concretada.

Si logramos encauzar la transición a un mundo más sostenible, hacia una especie de umbral 9, se verá de forma clara que la historia del género humano se articula en realidad en torno a un único umbral de complejidad creciente que alcanza su punto culminante con la gestión consciente del conjunto de la biosfera. Si consideramos que la historia de la humanidad se halla dividida en secciones se debe solo a que la contemplamos a muy corta distancia. El compuesto umbral general de la complejidad se inició con el aprendizaje colectivo. Tal como en su momento hizo la gravedad al concentrar grandes nubes de materia en el universo primitivo, el aprendizaje colectivo generó un conjunto de sociedades humanas cada vez más densas y complejas, aceleró el cambio y creó nuevas formas de dinamismo que pusieron en manos de los seres humanos la capacidad de ejercer un cierto control sobre la biosfera. El incremento de la velocidad de las transformaciones podría haber proseguido de manera indefinida hasta desembocar en una explosión catastrófica (una supernova humana, podríamos decir). Pero si conseguimos encarrilar correctamente la transición hacia un mundo sostenible, cuando echemos la vista atrás tendremos la impresión de que los seres humanos hemos sabido generar una forma de complejidad simultáneamente nueva y estable —del mismo modo que la fusión dio lugar a las novedosas y estacionarias estructuras de las estrellas, capaces de mantener a raya las fuerzas de contracción de la gravedad—. Entonces comprenderemos que entre los umbrales 6 y 9 lo que ha surgido en el planeta Tierra es un tipo de biosfera antes desconocido, dotado de unos termostatos rediseñados y de unas formas de regulación nuevas y más conscientes: las radicadas en la noosfera, es decir, en la órbita del intelecto. ¿Y qué nombre debiéramos dar a ese umbral? ¿El de Revolución Humana, tal vez?

MÁS ALLÁ DEL SER HUMANO: FUTUROS MILENARISTAS Y COSMOLÓGICOS

Seamos optimistas e imaginemos un mundo en el que la misión que acabo de explicar se ha materializado con éxito. El umbral número 9 se ha superado y la mayoría de los seres humanos prosperan ya en una sociedad global y estable basada en una relación más sostenible con la biosfera. Esto conlleva que las sociedades humanas podrían perdurar varias decenas de siglos más, o quizás incluso seguir en el planeta dentro de unos cuantos cientos de miles de años.

Cualquier especulación relacionada con el futuro termina apuntando al aterrador, impredecible y tal vez utópico universo del futuro a medio plazo (en términos cosmológicos). A estas escalas temporales, nuestros modelos son en realidad meras conjeturas. Las probabilidades de acertar son aproximadamente las mismas que en el siglo XIX tenían las películas que predecían que los aristócratas acabarían haciendo excursiones en bici por la superficie de la luna vestidos con traje de franela. Todo cuanto podemos hacer es pasar revista a algunas de las posibilidades que quizá logren concretarse, basándonos en las tendencias que hoy alcanzamos ya a percibir.

¿Asistiremos al surgimiento de unas estructuras gubernamentales globales capaces de sustituir en parte a los estado-nación y eliminar al fin la amenaza de una guerra nuclear? ¿Conseguirán los reactores de fusión proporcionarnos un nuevo período de abundancia energética? Y de ser así, ¿sabremos utilizarlos con mayor sensatez y limitar los impactos perjudiciales para la biosfera, sirviéndonos de ellos como de un instrumento destinado a sentar las bases de una vida buena accesible al conjunto de los seres humanos? ¿Conseguiremos encontrar fórmulas que nos permitan controlar flujos de energía superiores incluso a los de fusión y crear de ese modo unas civilizaciones de inimaginable complejidad? Un astrónomo ruso llamado Nikolái Kardashov ha argumentado que si existen otras civilizaciones capaces de operar con premisas similares a las del aprendizaje colectivo, muchas de ellas habrán descubierto la manera de captar toda la energía utilizable de sus planetas de origen, otras se las habrán arreglado para manejar la totalidad de la

energía disponible en su particular sistema solar, y unas cuantas podrían haber conseguido explotar el conjunto de la energía presente en una galaxia.

¿Tendrán que emigrar nuestros descendientes y abandonar la Tierra? ¿Alumbrarán la explotación minera de los asteroides? ¿Establecerán colonias en la Luna o en Marte? ¿Se instalarán en los planetas compatibles con la vida que orbitan en los sistemas estelares cercanos (lo que podría suceder si tendemos la vista hacia un horizonte lo suficientemente lejano)? ¿Seremos capaces de crear artificialmente nuevas formas de vida, nuevos cultivos más eficientes desde el punto de vista energético, o microbios dotados de la facultad de curar enfermedades o frenar los procesos cancerígenos? ¿Lograremos diseñar máquinas diminutas, nanocirujanos susceptibles de ser inyectados en el cuerpo para reparar un órgano averiado, o robots capaces de construir edificios sin supervisión humana por estar dotados de la habilidad de seguir las instrucciones de un conjunto de arquitectos electrónicos? ¿Podremos fabricar máquinas de inteligencia muy superior a la nuestra? Y en tal caso, ¿cómo asegurarnos de que permanezcan sometidas a nuestro control?

¿Produciremos nuevos seres humanos en el laboratorio? ¿Nos volveremos biónicos mediante la introducción de mejoras tanto microscópicas como macroscópicas que nos permitan disfrutar de una vida tan larga, y en tan buen estado de salud, que terminemos por transformarnos en algo diferente, en una especie de seres «transhumanos»? ¿Harán las nuevas tecnologías que el género humano intercambie ideas, pensamientos, emociones e imágenes de manera instantánea y continua hasta crear algo así como una mente global única e inmensa? ¿Terminará por desprenderse parcialmente la noosfera de su sustrato humano, transformándose en una suerte de fino estrato espiritual unificado y suspendido sobre la biosfera? ¿En qué momento de todo este proceso decidiremos los seres

humanos que la historia humana (tal como la entendemos hoy) ha llegado a su fin debido a que la descripción de nuestra especie no se atiene ya a las características propias del *Homo sapiens*?

¿Conseguirá la nueva ciencia modificar el modo en que comprendemos nuestra realidad y la del universo, hasta el punto de producir un vuelco completo en la actual historia de los orígenes? Si comparamos la historia de los orígenes que hoy manejamos con las vigentes hace cien años advertiremos que todo parece indicar que ese giro podría producirse muy pronto, y repetirse incluso numerosas veces.

Existen, por supuesto, eventualidades desconocidas que podrían torcer el rumbo de cualquier futuro posible en un par de segundos. Tal vez nuestra ciencia y nuestra tecnología sean ya lo bastante precisas para predecir el impacto de un asteroide, y quizás incluso dispongan incluso de las herramientas necesarias para impedir una catástrofe. Pero hay muchísimos desastres que son imposibles de prever, como por ejemplo..., el encuentro con otras formas de vida. Si damos con ellas, ¿tendremos que observarlas a través de un microscopio (o de unos ojos potenciados por medios biónicos)? ¿O serán ellas las que nos atrapen con unas pinzas gigantescas para colocarnos en una enorme placa de Petri y examinarnos con sus propios microscopios?

Después de estas disquisiciones se siente uno aliviado al poder ocuparse de nuevo de objetos relativamente simples, como los planetas, las estrellas, las galaxias y el propio universo.

Sabemos cómo seguir el rastro de los desplazamientos de las placas tectónicas, así que podemos aventurar más o menos dónde se encontrarán los continentes en cien millones de años. En el momento presente, todo parece indicar que las losas continentales volverán a reunirse en un nuevo supercontinente al que ya se le ha dado el nombre de Amasia porque agrupará las tierras que hoy conforman Asia y las dos Américas. No obstante, será la evolución del sol la que decida el destino último del planeta Tierra. Nuestro sol todavía tiene por delante unos nueve mil millones de años de vida.

Ahora bien, si evoluciona como otras estrellas parecidas, empezará a expandirse y a transformarse en una gigante roja en solo unos cuantos miles de millones de años. La Tierra quedará inmersa en las capas más externas de ese sol y se verá sometida a su influencia. A medida que nuestro planeta se recaliente, los seres vivos de gran tamaño se verán en aprietos cada vez más graves, y durante un largo período de tiempo los únicos organismos que conseguirán sobrevivir serán las correosas bacterias del grupo de las Arqueas, similares a las que hoy sobreviven en las fuentes termales del Parque de Yellowstone. Al final, también ellas desaparecerán, ya que la Tierra quedará estéril antes de ser engullida por las capas exteriores de una gigante roja cada vez más inestable e impredecible cuyas inmensas temperaturas evaporarán lo que quede del planeta. Ahí terminará la historia de la Tierra, tal como poco antes habría desaparecido todo objeto vivo que no hubiera podido trasladarse a los últimos confines del sistema solar o a otros complejos estelares. Y en cuanto al sol, tras pasar un largo período en fase de gigante roja, acabará por expulsar sus capas más externas en una titánica explosión, se convertirá en una enana blanca, pasará a encuadrarse en la parte inferior del diagrama de Hertzsprung-Russell y permanecerá allí, enfriándose, durante cientos de miles de millones de años.

Aproximadamente por la misma época en que nuestro sol se pase al lado oscuro, nuestra galaxia entrará en colisión con una de sus vecinas, la de Andrómeda. Visto desde fuera, el proceso será bastante suave, como el choque entre dos nubes, pero en el interior de ambas galaxias se producirán muchísimas turbulencias, pues las estrellas se atraerán y repelerán de un modo impredecible. Por consiguiente, la nueva galaxia formada por la fusión de la Vía Láctea con Andrómeda estará mucho más desorganizada que las dos hermosas espirales de las que surgió.

¿Y qué pasará con el conjunto del universo? En la actualidad, la mayoría de los cosmólogos están casi seguros de que se puede predecir su destino, puesto que el futuro del universo parece

depender de un pequeño número de variables. Las más críticas son su ritmo de expansión y la cantidad de materia o energía que contiene. En el pasado se creía que la fuerza de la atracción gravitatoria debida a la materia presente en el cosmos acabaría por frenar su expansión, le imprimiría el movimiento inverso y volvería a encogerlo hasta reducirlo al tamaño de un nuevo átomo primordial, que a su vez reproduciría la explosión primigenia y se expandiría hasta dar nacimiento a un nuevo universo, con lo que la secuencia podía repetirse en una infinita serie de sístoles y diástoles cósmicas. Sin embargo, el descubrimiento a finales de la década de 1990 de que los índices de expansión del universo están creciendo inducen a pensar que debe de existir una especie de energía oscura dotada de una fuerza lo suficientemente intensa para vencer la atracción gravitatoria de toda la masa y la energía del universo. Esto sugiere que el universo continuará expandiéndose indefinidamente y que está abocado a hacerlo además a una velocidad cada vez mayor.

Analizar los derroteros por los que puede discurrir el futuro lejano del universo nos permite comprender que el relato que hemos venido desgranando hasta el momento no es más que el prefacio de la obra. El desfile de todas las cosas tiene por delante un largo camino, y en ocasiones sembrado de dificultades. Los seres humanos estamos viviendo en los prolegómenos mismos de la historia global del cosmos, y la narración no ha hecho más que empezar. Nuestro universo es todavía joven y está lleno de vitalidad, y no solo tiene muchísimas cosas que vivir, sino que aún le queda por construir una inconcebible cantidad de nuevas estructuras complejas.

No obstante, en un futuro remotísimo, varios *fantastillones* de años después de que todos hayamos desaparecido, el relato empezará a adquirir tintes más sombríos, tanto en sentido literal como metafórico. La velocidad de expansión del universo continuará aumentando y aumentando a un ritmo endiablado. Las galaxias más distantes se desvanecerán, como los barcos, tras el horizonte espacio-temporal, y al final todo aquello que persista de nuestra

galaxia, sea inerte o animado, se encontrará tremendamente solo.[7] Las estrellas seguirán formándose y ardiendo dentro de 10^{15} años, época en la que el universo será diez mil veces más viejo que ahora. A partir de ahí, el cosmos empezará a acusar de veras su avanzada edad, pues las estrellas habrán dejado de brillar y todo permanecerá a oscuras. Nuestra galaxia se convertirá en una necrópolis cubierta por las cenizas, todavía tibias, de los cuerpos estelares y los planetas.

Pero todavía habrá cosas que sigan moviéndose en el cementerio. Los agujeros negros se tragarán los restos de los sistemas estelares y planetarios. Y cuando terminen su pantagruélico festín se enfrentarán unos a otros en una suerte de canibalesca guerra civil hasta que no quede en pie más que un puñado de agujeros negros, hinchados y abotargados. Estos objetos permanecerán en su sitio durante un período de tiempo verdaderamente inimaginable, quizá del orden de 10^{100} años, e irán trasudando energía hasta que, en última instancia, también ellos, consumidos y difuminados, acaben por evaporarse. Se verá así que todo aquello que en nuestro universo parecía capaz de reivindicar una existencia permanente era en realidad de naturaleza efímera. Es posible que incluso el espacio y el tiempo revelen ser simples formas, meras ondulaciones de un inmenso multiverso. Con esto, la entropía habrá logrado destruir al fin todo rastro de estructura y de orden.

Al menos en un universo. Pero acaso existe la posibilidad de que haya otros en los que poder seguir trabajando.

AGRADECIMIENTOS

Es imposible dar las gracias a todas las personas que me han ayudado con este libro, desde las que me han instruido hasta las que han leído los manuscritos de los borradores, pasando por las que me han señalado la existencia de libros importantes y autores imprescindibles, y las que han comentado el contenido de mis charlas o dado conferencias inspiradoras. Los seres humanos vivimos inmersos en un mar de ideas, y en la elaboración de un texto como este hay que atrapar las informaciones a medida que surgen y pasan flotando junto a nosotros, para después asociarlas con otras nociones y adaptarlas, lo que unas veces nos exige ahormarlas, otras tal vez modificarlas, y desde luego, en muchos casos, vincularlas de forma innovadora a otros planteamientos. No me cuesta recordar que el origen de algunos de esos conceptos guarda relación con diferentes personas, pero no es menos cierto que muchos de ellos se hallaban alojados en mi cerebro y que allí fueron fermentando, a veces durante varios años, antes de emerger en otra parte de mi conciencia —y no solo en forma distinta, sino también despojadas de cualquier etiqueta susceptible de remitirme a su fuente—. Por consiguiente, ignoro a quién específicamente debo agradecer muchas de las ideas que jalonan la presente obra. Todo cuanto puedo hacer es dedicar de manera general mi gratitud a los numerosos colegas y amigos que me han ayudado, así como al fecundo proceso del aprendizaje colectivo que ha abastecido mi mente de un sinfín de ideas surgidas del maravilloso y prolífico mundo de nuestros días. El empeño de la gran historia es un proyecto colectivo, una propiedad emergente que brota de las sinergias que se generan entre un número muy, muy grande de intelectos.

No obstante, hay algunos nombres que acuden enseguida a mi memoria. Un reducido grupo de estudiosos de intereses afines ha aunado esfuerzos en torno a la tarea de la gran historia y otras aspiraciones análogas y ha trabajado para lograr progresos tanto en el terreno de su enseñanza como en el de la investigación vinculada con sus objetivos. Entre sus integrantes no solo destaca la figura de algunos científicos, como el astrofísico Eric Chaisson o el sociólogo Johan Goudsblom, también sobresale la aportación de todos cuantos han contribuido a constituir y a promover la Asociación Internacional de la Gran Historia, a quienes mencionaré por orden alfabético: Walter Alvarez, Mojgan Behmand (junto con los numerosos colegas que la secundan en la Universidad Dominicana), Craig y Pamela Benjamin, Cynthia Brown, Leonid Grinin, Lowell Gustafson, Andréi Korotáyev, Lucy Laffitte, Jonathan Markley, John Mears (que empezó a dedicarse a la docencia de la gran historia al mismo tiempo que yo), Alessandro Montanari, Esther Quaedackers, Barry Rodrigue, Fred Spier, Joe Voros, Sun Yue y otros muchos que también han ayudado a levantar el edificio y el relato de la gran historia. Durante la redacción del primer manual universitario de gran historia tuve ocasión de trabajar en una colaboración particularmente estrecha con Craig Benjamin y Cynthia Brown, y quisiera destacar el ambiente tan amistoso y fructífero que siempre nos unió. Lamentablemente, mi amistad con Cynthia se vio truncada con su fallecimiento, ocurrido el 15 de octubre de 2017. Todos cuantos cultivamos este campo echaremos de menos a Cynthia, que fue una de las precursoras de lo que hoy es la gran historia. A lo largo de los años ha habido muchos especialistas en historia universal que han apoyado la idea de la gran historia. De entre ellos quisiera resaltar la labor de Felipe Fernández-Armesto, Bob Bain, Terry Burke, Ross Dunn, Pat Manning, Merry Wiesner-Hanks y muchos más. En particular, ha habido dos grandes historiadores del mundo que han vinculado su inmenso prestigio con este nuevo ámbito de conocimiento: William H. McNeill, que veía en la gran historia la continuación lógica de la historia del mundo en tanto que disciplina,

y Jerry Bentley, que fue el primero que me invitó a publicar análisis sobre la relación entre la gran historia y la historia del mundo. La Teaching Company* me pidió dar una serie de charlas sobre la gran historia, y Bill Gates, que asistió a esos coloquios, dio un tremendo impulso a nuestra materia al respaldar la creación de un programa de estudios destinado a los institutos de enseñanza secundaria, gratuito y accesible por Internet. También me animó a pronunciar, en 2011, una conferencia TED (Tecnología, Entretenimiento y Diseño) sobre la gran historia. Su contribución dio lugar al Proyecto de Gran Historia, que Michael Dix y sus colegas de Intentional Futures gestionan con una gran competencia profesional y que ahora cuenta además con un equipo encabezado por Andy Cook y Bob Regan. Entre las numerosas personas que han cooperado en la creación del Proyecto de Gran Historia hay cientos de profesores, colegios y estudiantes que han hecho la valerosa apuesta de enseñar y aprender las claves de esta ambiciosa e innovadora forma de abordar el conocimiento de los hechos pretéritos. El Foro Económico Mundial me ha permitido divulgar algunos aspectos de la gran historia en tanto que proyecto global, y he podido participar en la reunión que este organismo celebra anualmente en Davos, donde tuve el privilegio de ser presentado al público por dos premios Nobel: el exvicepresidente de Estados Unidos Al Gore y el astrofísico australiano Brian Schmidt. También se me ofreció la magnífica ocasión de visitar el lago Mungo y de reunirme con Mary Pappin, una sabia anciana de la tribu Mati Mati cuya familia desempeñó un papel decisivo en la tarea de propiciar el regreso de los restos del Hombre de Mungo y la Mujer de Mungo a sus tierras ancestrales.

He desarrollado la mayor parte de mi carrera profesional en la Universidad Macquarie de Sídney, y debo decir que la institución respaldó la idea de la gran historia desde el principio, tan pronto como en 1989 empecé a impartirla como asignatura junto con mis colegas del mundo universitario. Quiero dirigir desde aquí un testimonio de particular gratitud a Bruce Dowton y a sus compañeros por haber apoyado tanto la idea de la gran historia

como la creación del Instituto de Gran Historia de la Universidad Macquarie, a cuyo frente se encuentran profesionales altamente cualificados como Andrew McKenna, Tracy Sullivan y David Baker (que es el primer estudioso que ha obtenido un doctorado en nuestra disciplina, al menos hasta donde me es dado saber). En el transcurso de los años, mis colegas del departamento de Historia Moderna han proporcionado un inmenso apoyo a esta nueva forma de concebir la historia, y muchos de ellos me han secundado impartiendo a su vez la asignatura. Agradezco mucho su colaboración, en particular la de Marnie Hughes-Warrington, Peter Edwell y Shawn Ross. Mi gratitud va igualmente dirigida a los numerosos estudiantes de gran historia que han contribuido a que me mantenga siempre en el buen camino, ya que han sabido instarme invariablemente a centrar de nuevo la atención en las preguntas más sencillas, que son siempre las de mayor calado. También he tenido ocasión de disfrutar de ocho años maravillosos en la Universidad Estatal de San Diego, cuyos historiadores no solo me han ofrecido su respaldo, sino también muchas observaciones inteligentes que me han permitido considerar la influencia que este nuevo enfoque de la historia puede tener en las distintas comunidades académicas de Estados Unidos; sin olvidar que los alumnos de posgrado del centro se han revelado notablemente disciplinados y desempeñado con magnífica eficacia sus labores de tutoría en la asignatura de gran historia.

Son muchos los expertos, de muy distintas áreas de conocimiento, que me han ofrecido la oportunidad de comprender de un modo nuevo la materia de la que me ocupo, y muchos también los que me han ayudado a cambiar de rumbo. De entre ellos citaré los nombres de Lawrence Krauss, Charles Lineweaver, Stuart Kauffman, Ann McGrath, Iain McCalman, Will Steffen, Jan Zalasiewicz y muchísimos, muchísimos más. He contado asimismo con el enorme apoyo y las fructíferas aportaciones de los editores de Little, Brown y Penguin: Tracy Behar, Charlie Conrad y Laura Stickney. Agradezco a Tracy Roe que haya revisado

escrupulosamente mis textos y detectado con su aguda vista todos los gazapos que a mí se me habían pasado por alto. Y tengo contraída asimismo una inmensa deuda de gratitud con John Brockman, que apoyó la idea de este libro desde el instante mismo en que se lo sugerí.

Varios amigos han tenido la amabilidad de examinar los sucesivos borradores de este manuscrito y aportar además sus valiosos comentarios. Entre ellos figuran Craig Benjamin, Cynthia Brown, Nick Doumanis, Connie Elwood, Lucy Laffitte, Ann McGrath, Bob Regan, Tracy Sullivan y Ian Wilkinson.

Para mi familia, la gran historia se ha convertido en algo así como una industria artesanal. Chardi, Emily y Joshua han echado un provechoso vistazo al texto en sus distintas fases de elaboración, y a lo largo de los años han sido muchas las ocasiones en que sus comentarios e ideas me han hecho emprender nuevos caminos. Debo a Chardi la honda apreciación de que la gran historia es en realidad una historia moderna de los orígenes. A todos ellos, así como al resto de la familia (de la que destacaré a mi madre, que fue mi primera profesora), les estoy profundamente agradecido, porque gracias a ellos mi vida ha contado con la bendición de la ternura y el amor que supone saberse rodeado de personas tan cercanas. Dedico este libro a toda mi familia, a mis nietos Daniel Richard y Evie Rose Molly, y a los estudiantes del mundo entero que aceptan el trascendental reto de construir un mundo mejor.

APÉNDICE

ESTADÍSTICAS ASOCIADAS CON LA HISTORIA DE LA HUMANIDAD

Estadísticas de la historia humana en las épocas Holoceno y Antropoceno*						
ERA	A: AÑO 0 = 2000 a.e.c.	B: POBLACIÓN (millones)	C: UTILIZACIÓN TOTAL DE ENERGÍA GJ/año (= 0,001 exajulios (= B * D)	D: UTILIZACIÓN DE ENERGÍA PER CÁPITA GJ/cap/año (1os 3 = estimación máxima)	E: ESPERANZA DE VIDA (Años) (1os 3 = estimación máxima)	F: POBLACIÓN DE LOS ASENTAMIENTOS MÁS GRANDES (en miles) (1º = estimación máxima)
HOLOCENO	–10.000	5	15	3	20	1
	–8.000					3
	–6.000					5
	–5.000	20	60	3	20	45
	–2.000	200	1.000	5	25	1.000
	–1.000	300	3.000	10	30	1.000
ANTROPOCENO	–200	900	20.700	23	35	1.100
	–100	1.600	43.200	27	40	1.750
	0	6.100	457.500	75	67	27.000
	10	6.900	517.500	75	69	

* El contenido de las columnas A a E se basa en el texto de Vaclav Smil titulado *Harvesting the Biosphere: What We Have Taken from Nature, op. cit., loc.* 4528, Kindle; la columna F se ha tomado en cambio de Ian Morris, *Why the West Rules — for Now*, pp. 148-149, aunque en sus cifras se han interpolado datos correspondientes a los últimos diez mil años [hay traducción castellana: *¿Por qué manda Occidente... por ahora?*, Ático de los Libros, Barcelona, 2014].

GLOSARIO

Presentamos a continuación una lista de los términos técnicos y las voces que se emplean de manera bien diferenciada en el presente libro.

acreción: proceso por el cual la materia que orbita en torno a una estrella se aglomera para constituir planetas, satélites y asteroides.

ADN: siglas del ácido desoxirribonucleico, la molécula que contiene la información genética de la mayor parte de los seres vivos.

agricultura: es el amplio abanico de tecnologías que permitieron que los seres humanos maximizaran la explotación de los flujos de energía y recursos que encontraban a su disposición. Para conseguirlo, esas sociedades tuvieron que manipular su entorno para incrementar la producción de aquellas plantas y animales que consideraban útiles.

agricultura del palo incendiario: tecnología paleolítica basada en prender fuego de forma regular y deliberada a la vegetación no considerada útil para incrementar la productividad de la tierra.

agujero negro: región cuya elevadísima densidad no permite que nada pueda escapar a su atracción gravitacional, ni siquiera la luz. Suele formarse como consecuencia de la implosión que sufren las estrellas supermasivas al final de su ciclo vital. Es posible que en el centro de todas las galaxias haya un agujero negro.

antimateria: partículas subatómicas idénticas al resto de las partículas subatómicas pero provistas de una carga eléctrica opuesta. Es el caso de los positrones (es decir, electrones con

carga positiva). Cuando la materia se encuentra con la antimateria sus componentes se aniquilan mutuamente y se transforman en energía pura.

año luz: distancia que recorre la luz en el vacío durante un año terrestre, lo que equivale aproximadamente a 9,5 billones de kilómetros.

aprendizaje colectivo: proceso, exclusivo de los seres humanos, que permite que los individuos compartan información con gran precisión y en cantidades muy elevadas, lo que hace que esa información vaya acumulándose de generación en generación. Esta facultad es la clave de que nuestra especie esté consiguiendo controlar cada vez más la información y la biosfera.

arbitraje: acción consistente en comprar a precios económicos en un mercado para vender mucho más caro en otro y obtener así grandes beneficios.

ARN: ácido ribonucleico. Pariente próximo del ADN que se halla presente en todas las células. Puede transportar información genética y realizar tareas metabólicas.

Arquea: uno de los tres principales dominios del mundo vivo, compuesto por organismos procariotas unicelulares. *Véase también* bacterias y eucariotas.

átomo: es la partícula de materia ordinaria más pequeña. Está formado por protones, neutrones y electrones. Es posible que la materia atómica represente solo el 5 % de la masa total del universo. *Véase también* energía oscura y materia oscura.

ATP (adenosín trifosfato): la molécula que todas las células vivas emplean para transportar energía.

bacterias: organismos unicelulares procariotas pertenecientes al dominio de Eubacteria, uno de los tres principales dominios filogenéticos. *Véase también* Arquea y eucariotas.

biosfera: esfera del planeta Tierra configurada por los seres vivos y sus subproductos, que en ella son además la entidad dominante.

candela astronómica estándar: un objeto astronómico (como por ejemplo una de las cefeidas variables o un tipo de supernova cuya distancia respecto de la Tierra pueda ser determinada) que es posible utilizar para medir las distancias que nos separan de otros objetos cósmicos.

capitalismo: sistema social dominado por la actividad mercantil y la acción de los comerciantes en la que los gobiernos favorecen el intercambio de mercancías debido a que buena parte de sus ingresos proceden del comercio.

carbono: sexto elemento de la tabla periódica. El virtuosismo con el que se combina con otros elementos explica que resulte fundamental para los seres vivos.

catalizador: molécula (por regla general una proteína) que facilita la ocurrencia de determinadas reacciones químicas mediante la reducción de la energía de activación requerida para su desencadenamiento. Lo característico de los catalizadores es que ellos mismos permanecen inalterados por la reacción que favorecen.

cazadores y recolectores acomodados: grupos sedentarios dedicados a la caza y la recolección, como en el caso de los natufienses. Es habitual encontrarlos en regiones con una excepcional abundancia de recursos naturales.

cefeida variable: se trata de una estrella cuyas variaciones de brillo siguen una pauta regular. Hay dos tipos principales de cefeidas, y dado que su índice de variación se relaciona con su luminosidad intrínseca, puede estimarse su distancia (lo que a su vez permite valerse de las cefeidas como candelas astronómicas estándar para la medición de la separación que existe entre dos objetos astronómicos).

ciclos de Milanković: variaciones registradas en la órbita y la inclinación del eje de la Tierra que afectan a la cantidad de energía que el planeta recibe del sol. La existencia de estas variaciones contribuye a explicar la secuencia de glaciaciones vivida a lo largo de la época pleistocena.

ciencia: bagaje de tradiciones modernas rigurosas e integradas por estudios del mundo y el universo, basados siempre en materiales probatorios. Su contenido viene desarrollándose desde la revolución científica del siglo XVII.

civilizaciones agrícolas: comunidades formadas por millones de personas y sustentadas en la práctica de la agricultura. Estas poblaciones no solo cuentan con ciudades, estados, sistemas burocráticos, ejércitos y jerarquías sociales, sino que también conocen la escritura.

combustibles fósiles: materia orgánica enterrada y fosilizada. Consiste fundamentalmente en carbón, petróleo y gas natural. Estas sustancias contienen cúmulos de energía muy antigua procedentes de la fotosíntesis. Son las fuentes de energía primaria del mundo moderno.

complejidad: las entidades complejas poseen un mayor número de partes móviles que las simples, y además esas partes aparecen unidas con una precisión que permite el surgimiento de propiedades nuevas.

condiciones Ricitos de Oro: condiciones y entornos previos, muy infrecuentes, en los que se dan las circunstancias y los ingredientes «perfectos» para el surgimiento de nuevas formas de complejidad.

corrimiento al rojo: desplazamiento al extremo rojo que muestran las líneas de absorción del espectro de emisión. Su presencia indica que un objeto astronómico dado se está alejando de la Tierra. Es uno de los elementos clave que prueban que el universo se está expandiendo.

corteza terrestre: capa superficial del planeta, compuesta sobre todo por rocas ligeras, como las graníticas y basálticas, una vez enfriadas lo suficiente para solidificarse. Es la región en la que habitan la mayor parte de los organismos vivos.

cosmología: estudio del universo y su evolución.

cosmología del Big Bang: paradigma cuya idea nuclear surgió en la década de 1960 con el propósito de explicar el surgimiento de nuestro universo a partir de una concentración de energía diminuta e inmensamente densa ocurrida hace 13.820 millones de años.

Creciente Fértil: arco de tierras bien irrigadas en las que se inició la agricultura. Está situado en torno a la región de Mesopotamia.

cuark: partícula subatómica a partir de la que surgen los protones y los neutrones gracias a la acción de la fuerza nuclear fuerte.

datación radiométrica: técnicas destinadas a estimar la edad de los objetos desarrolladas a mediados del siglo xx. Se basan en el ritmo constante que sigue la desintegración de los isótopos radioactivos. Sin estas técnicas no habría sido posible establecer la cronología expuesta en el presente libro.

diagrama de Hertzsprung-Russell: diagrama que levanta el mapa del brillo o la luminosidad intrínseca de las estrellas (que indica la cantidad de energía que emiten) y lo contrasta con su color (que señala la temperatura de su superficie). Ofrece a los astrónomos un potente método de clasificación para ordenar en función de sus características los distintos tipos de estrellas y las diferentes formas en que evolucionan.

diferenciación: proceso que provocó el calentamiento de la Tierra primitiva y su posterior fusión, lo que dispuso sus materiales en capas ordenadas en función de su densidad, de tal modo que las más densas quedaron por debajo de las menos densas, dando lugar, entre otros, a los estratos que denominamos núcleo, manto y corteza.

domesticación: modificación genética que se produce en una especie cuando evoluciona de forma conjunta con otra. Se trata de un proceso fundamental para la agricultura.

efecto Doppler: aparente cambio en la frecuencia de la radiación que emiten los cuerpos en función de que se acerquen o se alejen unos de otros. Tiene aplicación en los detectores de

velocidad que emplea la policía de tráfico, y sirve también para medir el movimiento de las estrellas y las galaxias y para determinar si se alejan de la Tierra o se acercan a ella.

electromagnetismo: una de las cuatro formas fundamentales de la energía. Sus efectos son muy intensos a pequeñas escalas y puede presentarse con cargas positivas o negativas. Es la variante energética más importante de la química y la biología.

electrón: partícula subatómica de carga negativa. Normalmente orbita en torno a los núcleos atómicos.

elemento: forma básica de la materia atómica. Los elementos se distinguen entre sí por el número de protones de su núcleo. Los elementos se hallan clasificados en la tabla periódica en función de sus propiedades distintivas. Existen aproximadamente noventa y dos elementos estables.

emergencia: *véase* propiedades emergentes.

enana blanca: estrella muerta y densa que ha explotado y expulsado todas sus capas exteriores y que de ese modo entra en un proceso de enfriamiento que puede prolongarse durante muchos miles de millones de años.

energía de activación: inyección inicial de energía capaz de poner en marcha reacciones susceptibles de generar una cantidad de energía mucho mayor, como ejemplifica adecuadamente el hecho de que una cerilla encendida pueda desatar un incendio forestal.

energía oscura: es un tipo de energía cuya fuente y exacta naturaleza todavía no se entienden, aunque no solo podría ser responsable de la expansión acelerada del universo sino también del 70 % de su masa.

energía: potencial para que las cosas sucedan, se muevan o cambien. En nuestro universo, la energía se presenta en cuatro formas fundamentales (la gravedad, el electromagnetismo, y las fuerzas nucleares fuerte y débil), aunque también exista bajo el aspecto de energía oscura.

energía calorífica: es la energía cinética (es decir, la energía derivada del movimiento) que anima la agitación aleatoria de todas las partículas de materia. La materia solo pierde la totalidad de su energía calorífica al llegar al cero absoluto. *Véase* temperatura.

energía libre: energía que no fluye de forma aleatoria y que por ello mismo es capaz de hacer trabajo (por ejemplo, la energía del agua que atraviesa las palas de una turbina).

entropía: la tendencia a la desestructuración que muestra el universo, según explica la segunda ley de la termodinámica.

enzima: molécula bioquímica que actúa como catalizador y facilita que se produzcan en la célula una serie de reacciones que, de otro modo, requerirían unas cantidades de energía de activación muy superiores.

eón Arcaico: una de las cuatro grandes secciones en que se divide la historia del planeta Tierra. Se inició hace 4.000 millones de años y terminó hace 2.500 millones de años.

eón Fanerozoico: una de las cuatro principales divisiones de la historia del planeta Tierra. Se inicia hace unos 540 millones de años y se prolonga hasta el presente. Es la era de la macrobiología, o de los organismos de gran tamaño.

eón Hádico: uno de los cuatro períodos más importantes en que se divide la historia de nuestro planeta. Se inició hace 4.600 millones de años, es decir, en el momento en que se formó la Tierra y concluyó hace aproximadamente cuatro mil millones de años.

eón Proterozoico: una de las cuatro principales secciones temporales en que se divide la historia del planeta Tierra. Comenzó hace unos 2.500 millones de años y terminó hace 540 millones.

época antropocena: es el período más reciente de la historia humana. A lo largo del mismo, los seres humanos pasaron a convertirse en una fuerza dominante, capaz de generar grandes

transformaciones en la biosfera. Se ha propuesto considerar que se trata de una nueva era geológica, surgida inmediatamente después del Holoceno.

época holocena: período geológico comprendido entre el fin de la última era glacial y el momento presente. Su inicio se sitúa hace unos 11.700 años.

época pleistocena: período geológico que se inicia hace aproximadamente 2,6 millones de años y finaliza hace unos 11.700 años. Se caracteriza por el predominio de las glaciaciones.

era agraria: período de la historia de la humanidad dominado por la presencia de tecnologías agrícolas. Se inició tras la última glaciación y terminó hace dos o tres siglos.

espacio-tiempo: Einstein expuso el argumento de que la mejor forma de entender lo que son el espacio y el tiempo es verlos como parte de un mismo marco universal. Dio a ese marco el nombre de espacio-tiempo.

espectroscopia: instrumento que descompone la luz en sus distintas frecuencias. Se utiliza para determinar la composición química de los objetos astronómicos.

estrella: cuerpo cósmico que se forma cuando en el centro de una vasta porción de materia, que se colapsa por efecto de su propia fuerza gravitatoria, empiezan a producirse reacciones de fusión. La gravedad reúne a las estrellas en grandes acumulaciones que constituyen las galaxias.

eucariotas: miembros del dominio de Eucaria, una de las tres grandes divisiones del mundo vivo. Los organismos eucariotas están formados por células dotadas de orgánulos internos. La evolución de los primeros eucariotas se produjo como consecuencia de un conjunto de fusiones entre microbios pertenecientes a los otros dos dominios (procarióticos) de la vida: Eubacteria y Arquea. Todos los organismos multicelulares están compuestos de células eucariotas. *Véase también* Arquea, bacterias, procariotas.

explosión cámbrica: súbita proliferación de organismos de gran tamaño provistos de elementos corporales endurecidos. Tuvo lugar hace 540 millones de años, aproximadamente.

física cuántica: estudio de los fenómenos que se producen en el plano subatómico, en el que es imposible identificar la posición exacta de las partículas o su movimiento, con lo que las leyes físicas han de formularse en términos probabilísticos.

forrajeo: conjunto de tecnologías características del período Paleolítico, todas ellas basadas en la obtención de recursos en el medio y con la particularidad de someter luego esos recursos a un procesado muy escaso.

fotón: partícula de energía electromagnética carente de masa que en el vacío se mueve a la velocidad de la luz y que también se comporta como una onda.

fotosíntesis: proceso por el que las plantas y algunos organismos de características propias de los vegetales captan la energía solar para efectuar su metabolismo.

fuerza nuclear débil: una de las cuatro formas fundamentales de la energía. Actúa a escalas subatómicas y es responsable de muchas de las formas que adopta la desintegración nuclear.

fuerza nuclear fuerte: una de las cuatro formas fundamentales de la energía. Opera a escalas subatómicas. Además de ser lo que une sólidamente entre sí a los cuarks y los convierte en protones y neutrones, es también lo que mantiene la cohesión de los núcleos atómicos.

fusión: se produce cuando la violencia de la colisión entre los protones es tan elevada que estos consiguen superar las fuerzas de repulsión de sus respectivas cargas positivas, quedando unidos por la fuerza nuclear fuerte. La fusión va acompañada de la liberación de una inmensa cantidad de energía, dado que una parte de la materia implicada se transforma en energía. Es el factor que explica la potencia de las bombas de hidrógeno y la energía que emiten las estrellas.

galaxia: acumulación de millones o de miles de millones de estrellas, cohesionadas por efecto de la gravedad. La galaxia en la que nos hallamos es la Vía Láctea.

gas: estado de la materia en el que las moléculas o los átomos no se encuentran unidos por enlaces fuertes.

gases de efecto invernadero: son gases como el dióxido de carbono y el metano, que absorben y retienen la energía del sol. Si su concentración atmosférica es lo bastante alta, los gases de efecto invernadero tienden a incrementar las temperaturas existentes en la superficie terrestre.

genoma: nombre que damos a la información contenida en el ADN de todas las células. Es el encargado de regular el funcionamiento celular y también lo que permite que la célula realice copias fieles de sí misma.

gigante roja: estrella agonizante, como sucede por ejemplo con Betelgeuse, en la constelación de Orión, que se ha expandido y posee una superficie de temperatura inferior (y por tanto más rojiza) que la de un astro plenamente activo.

glaciaciones: nombre que se da a la era de las glaciaciones, interrumpida por períodos interglaciares de temperaturas más suaves, que se inició hace 2,6 millones de años aproximadamente, a principios de la época pleistocena.

globalización: progresión creciente de la escala a la que operan las redes de intercambio, cuya magnitud comienza a extenderse por la totalidad del planeta a partir del año 1500 d. C.

gravedad: una de las cuatro formas fundamentales de la energía. Pese a ser débil, actúa a gran escala y tiende a unir todo cuanto tenga masa o energía. Einstein mostró que la gravedad funciona curvando la geometría del espacio-tiempo.

helio: elemento químico de número atómico 2 (lo que significa que tiene dos protones en el núcleo). Es el segundo elemento más abundante del universo. Químicamente inerte.

historia de los orígenes: exposición de la evolución global de la totalidad del espacio-tiempo basada en los últimos y más exactos conocimientos que posee una determinada comunidad. Las historias de los orígenes se hallan presentes en casi todas las tradiciones religiosas y educativas y ofrecen un sustrato sólido a la comprensión del lugar que uno mismo ocupa en el continuo espacio-temporal.

homeostasis: define un estado de equilibrio. El hecho de que sean capaces de percibir los cambios que se registran en el medio en el que viven permite a los seres vivos conservar su homeostasis y adaptarse a esas variaciones.

homininos: primates bípedos de los que desciende nuestra propia especie y que han continuado evolucionando después de que la rama de nuestros antepasados se separara del linaje evolutivo del que acabarían surgiendo los chimpancés, hace unos siete millones de años.

Homo sapiens: especie de homínido (o primate hominoideo) al que pertenecen todos los lectores de este libro.

hidrógeno: elemento químico de número atómico 1 (es decir, con un protón en el núcleo). Es el elemento más abundante del universo.

inflación: en términos cosmológicos, período presidido por una expansión extremadamente rápida del universo. Tuvo lugar en las fracciones iniciales del primer segundo posterior al Big Bang.

información: normas subyacentes que determinan la forma en que puede producirse un cambio. Algunas de esas normas son universales, pero los organismos vivos necesitan detectar y reaccionar a la información local, es decir, a un conjunto de reglas que solo se aplican a su entorno inmediato. El término «información» también puede hacer referencia al conocimiento relacionado con el funcionamiento de las cosas.

informávoros: entidad que consume información tal como los carnívoros ingieren carne. Todos los seres vivos son informávoros.

isótopo: átomos de un mismo elemento con idéntico número de protones, pero con diferente cantidad de neutrones.

kelvin: escala de temperaturas igual a la Celsius, aunque con el punto de inicio situado en el cero absoluto (–273,15 ºC). El punto de congelación del agua es 0 ºC, o 273,15 K.

líneas de absorción: franjas de color oscuro que aparecen al analizar con un espectroscopio la luz de las estrellas; dichas franjas indican la presencia de una serie de elementos particulares, caracterizados por haber absorbido parte de la energía estelar. Las bandas pueden servir para detectar el movimiento de objetos muy distantes, dado que las líneas oscuras viran hacia el extremo rojo o el azul del espectro en función de si se alejan de nosotros o se nos acercan.

líquido: estado fluido de la materia en el que los átomos o las moléculas se encuentran unidos por enlaces pero conservan la capacidad de resbalar unos sobre otros. Todo líquido adopta la forma del recipiente que lo contiene.

Luca: último antepasado común universal. Antepasado teórico de todos los seres vivos de la Tierra cuyas características se deducen de los datos conocidos.

luna: cuerpo planetario que orbita en torno de la Tierra. Surgió como consecuencia de una colisión con otro cuerpo planetario ocurrida poco después de la formación de nuestro planeta.

manto: capa de rocas medio fundidas que se encuentra bajo la corteza terrestre y encima del núcleo. Tiene unos tres mil kilómetros de espesor.

mapa: en lenguaje corriente, imagen esquemática de un paisaje o una región geográfica. En este libro, la palabra se utiliza a menudo en sentido metafórico para referirse a la idea gráfica que nos hacemos tanto del espacio y el tiempo como de la totalidad del universo y su historia, aunque siempre para identificar el sitio que nosotros mismos ocupamos en el orden de las cosas.

materia: es el «tejido» físico del universo. Su principal característica es que ocupa espacio. Einstein mostró que la materia está compuesta por energía comprimida y que es posible volver a transformarla en energía (por ejemplo, mediante la fusión protónica).

materia oscura: es una materia con efectos gravitatorios detectables, y aunque todavía no comprendamos bien de qué fuente procede ni que forma tiene, podría explicar hasta un 25 % de la masa total del universo.

megafauna: grandes mamíferos. Muchos se vieron abocados a la extinción a finales del Paleolítico, poco después de la llegada de los seres humanos a Australasia, Siberia y las dos Américas.

metabolismo: es la capacidad que tienen los organismos vivos de aprovechar y utilizar los flujos de energía de su entorno.

metazoos: organismos multicelulares. Es también lo que denominamos «vida de gran tamaño», o macrobiología.

meteorito: uno de los numerosos escombros espaciales que acaba estrellándose sobre la superficie terrestre. La mayor parte de los meteoritos apenas han cambiado desde la creación del sistema solar, razón por la que nos proporcionan información sobre la formación del sistema solar y su evolución.

molécula: grupo de átomos unidos por enlaces químicos.

multiverso: idea especulativa que sostiene la eventual existencia de múltiples universos, quizá dotados de un conjunto de leyes fundamentales y formas de energía ligeramente diferentes.

natufienses: término arqueológico utilizado para aludir a los «cazadores y recolectores acomodados» que vivieron en el Creciente Fértil de la cuenca oriental mediterránea hace 14.500 años y que desaparecieron hace 11.500.

nivel trófico: estrato de la cadena alimentaria a través del cual las plantas transfieren la energía fotosintética que han acumulado a los herbívoros, a los carnívoros y a las élites de las sociedades humanas. En cada uno de los diferentes niveles se pierde una importante cantidad de energía, lo que significa que siempre se

cumple la importante regla de que las poblaciones son tanto menores cuanto más elevado es el nivel en el que se encuentran.

neutrón: partícula subatómica habitualmente presente en los núcleos atómicos. Su masa es similar a la del protón, pero carece de carga eléctrica.

núcleo atómico: centro denso del átomo, principalmente integrado por neutrones y protones.

núcleo terrestre: porción central y más densa de la Tierra, predominantemente compuesta por hierro y níquel. Su principal propiedad consiste en generar un campo magnético protector en torno de la Tierra.

orden (o estructura): disposiciones de la materia y la energía que no son de carácter aleatorio, o lo que es lo mismo, que están provistas de un patrón reconocible.

oxígeno: elemento químico de número atómico 8. Tremendamente reactivo.

Pangea: nombre del supercontinente cuya existencia se inició hace unos trescientos millones de años y terminó hace doscientos millones de años.

paradigma: idea que, además de ser ampliamente aceptada por los investigadores de un determinado campo de estudio, unifica la información presente en dicha área de conocimiento. Ejemplos de paradigma son la cosmología del Big Bang (en astronomía), la tectónica de placas (en geología) o la selección natural (en biología). Se trata de una noción basada en la obra del historiador de la ciencia Thomas S. Khun.

paralaje: movimiento aparente que presenta un objeto en relación con el fondo sobre el que se destaca a medida que el observador se desplaza. Tanto los agrimensores como los astrónomos utilizan este fenómeno para calcular las distancias que nos separan de un objeto remoto o de una estrella cercana.

partículas subatómicas: son los componentes de los átomos, como los protones, los neutrones y los electrones.

período de semidesintegración: tiempo que tarda en desintegrarse la mitad de un isótopo radioactivo. Es un concepto crucial para la datación radiométrica, pues el hecho de que los isótopos diferentes tengan períodos de semidesintegración distintos permite utilizar a los primeros en el establecimiento de la antigüedad de aquellos objetos o acontecimientos que no se sitúan en la misma escala temporal.

período Paleolítico: fase de la historia que se inicia con la aparición de nuestra especie, hace unos doscientos mil años, y que termina a finales de la última Edad de Hielo, con el arranque de las actividades agrícolas y ganaderas, hace aproximadamente once mil años.

planeta: objeto astronómico formado en el entorno de una estrella químicamente enriquecida y que orbita en torno a ella.

planeta Tierra: objeto cósmico en el que habitamos los seres humanos y que quizá sea también el único poblado de seres vivos de todo el universo.

plasma: estado de la materia en el que las temperaturas son tan elevadas que las partículas subatómicas se revelan incapaces de unirse para formar átomos.

primera ley de la termodinámica: *véase* termodinámica.

procariotas: organismos unicelulares carentes de núcleo y pertenecientes a los dominios de Eubacteria y Arquea. Las primeras formas de vida que surgieron en la Tierra eran procariotas. *Véase* eucariotas.

propiedades emergentes: propiedades nuevas que van surgiendo a medida que se unen dos o más estructuras preexistentes para constituir una estructura nueva cuyas propiedades no se hallan presentes en las partes que la integran. Las estrellas, por ejemplo, tienen propiedades que no se encuentran en la materia subatómica que las compone.

protón: partícula subatómica con carga eléctrica positiva que se encuentra en los núcleos atómicos. La cantidad de protones es lo que determina el número atómico de un elemento.

quimiosmosis: es el movimiento de iones que se produce en función del gradiente de concentración de partículas eléctricas que hay a uno y otro lado de la membrana celular. En las células, la ATP sintasa de dicha membrana utiliza esta energía para recargar las moléculas de ATP.

radiación adaptativa: períodos de rápida evolución y diversificación biológica. Es frecuente que se produzcan inmediatamente después de un episodio de extinción generalizada.

radiación de fondo de microondas: radiación residual del momento en el que se formaron los primeros átomos, unos 380.000 años después del Big Bang. Todavía puede detectarse en la actualidad, y de hecho, como elemento probatorio es una de las claves de bóveda de la cosmología del Big Bang.

radioactividad: tendencia a la desintegración espontánea de los núcleos de muchos átomos, que de este modo emiten partículas subatómicas.

religión: conjunto de tradiciones espirituales, en ocasiones notablemente institucionalizadas, que parecen contener siempre alguna forma de historia de los orígenes.

respiración: absorción de oxígeno que efectúan los animales. También se entiende por respiración el hecho de que las células utilicen el oxígeno para liberar la energía que almacenan los glúcidos.

sedentarismo: modo de vida opuesto al nómada en el que los individuos y las familias permanecen casi todo el tiempo cerca de sus hogares, que establecen de forma permanente. Suele asociarse por regla general con la agricultura, pero a veces también con los hábitos de los cazadores y recolectores acomodados.

segunda ley de la termodinámica: *véase* termodinámica.

selección natural: idea clave de Charles Darwin según la cual los organismos sobreviven y se reproducen, o no, en función de su adecuación al medio. Este mecanismo es el principal motor de la evolución.

ser humano: miembro de la especie *Homo sapiens*.

simbiosis: relación de dependencia entre dos especies. El vínculo que se establece puede llegar a ser muy estrecho, hasta el punto de influir en la forma en que evolucionan las dos especies asociadas. La relación que existe entre las plantas cultivadas y los animales domesticados es una forma de simbiosis.

sol: la estrella local en cuya órbita vivimos. Es la principal fuente de la energía que anima a la biosfera.

sólido: estado de la materia en el que los átomos y las moléculas individuales se encuentran tan estrechamente unidas que no pueden modificar fácilmente su posición.

supernova: explosión masiva que tiene lugar en la última fase del ciclo vital de una gran estrella. En el interior de las supernovas se generan muchos elementos químicos nuevos.

supernova de tipo 1a: es una clase de supernova que posee una luminosidad intrínseca conocida, lo que permite utilizarla como candela astronómica estándar.

tabla periódica: cuadro en el que se presentan los elementos químicos ordenados y agrupados en función de la semejanza de sus características. Fue concebido por el químico ruso Dmitri Mendeléyev.

tectónica de placas: idea paradigmática surgida en la década de 1960 para explicar que las corrientes convectivas presentes en el interior del manto terrestre e impulsadas por las elevadas temperaturas del núcleo del planeta provocan el movimiento de las placas tectónicas de la superficie del globo.

temperatura: en su acepción científica, este término indica el valor promedio de la energía cinética (es decir, de la energía derivada del movimiento) que poseen los átomos que componen un objeto dado.

termodinámica: es el estudio de la forma en que fluye la energía y el examen de sus cambios de forma. La primera ley de la termodinámica sostiene que la cantidad total de energía del universo es constante, es decir, que «se conserva». La segunda

ley de la termodinámica explica que la energía tiende a adoptar formas cada vez más aleatorias o caóticas, con lo que, a largo plazo, el universo está abocado a mostrar pautas desestructuradas, o a una entropía creciente. *Véase* entropía.

trabajo: en la teoría termodinámica es la capacidad de generar cambios de carácter no aleatorio.

transición de fase: cambio de estado, como por ejemplo el paso del estado gaseoso a los estados líquido o sólido.

transición demográfica: en la época moderna, el descenso de la mortandad es el factor que marca la evolución numéricamente ascendente de las poblaciones. Sin embargo, la creciente urbanización ha provocado un descenso de los índices de fertilidad, con lo que, en la actualidad, el incremento de la demografía se está ralentizando. La transición demográfica ha transformado el modo en hoy nos planteamos la idea de la familia y los roles de género antiguamente predominantes en la mayor parte de las sociedades campesinas.

umbrales de complejidad creciente: períodos de transición en los que aparece algo nuevo y más complejo, algo dotado de propiedades emergentes nunca antes vistas. El relato que transmite este libro se vertebra en torno a ocho grandes umbrales de complejidad creciente.

universo: conjunto de todas las cosas que conocemos y de las que tenemos pruebas. Se formó en el llamado Big Bang.

vida: propiedad emergente que presentan todos los organismos vivos. Resulta difícil definirla con precisión, dado que solo conocemos la que existe en el planeta Tierra, pero entre sus cualidades se encuentran la capacidad de conservar la homeostasis, mantener un sistema metabólico, reproducirse y evolucionar.

viento solar: flujo de partículas subatómicas cargadas procedente del sol.

zonas del mundo: vastas regiones de la geografía habitada (Afro-Eurasia, Australasia, las dos Américas y el Pacífico) que hasta el año 1500 d. C. permanecieron casi totalmente aisladas unas de otras, con lo que la evolución histórica de cada una de ellas adoptó un rumbo muy distinto.

PARA SEGUIR LEYENDO

En las notas he indicado algunos de los libros que me han parecido más útiles para los temas que he tratado específicamente a lo largo del texto. Sin embargo, la mayoría de las obras son estudios recientes, de modo que muchos de los trabajos clásicos, importantes, aunque hoy en día superados, no han quedado reflejados. Es lo que ocurre, por ejemplo, con la *Breve historia del mundo* de H. G. Wells, o con el espléndido *Cosmos* de Carl Sagan. La lista que se ofrece a continuación se centra en particular en un conjunto de manuales que examinan con una suerte de gran angular el curso de las épocas pasadas. Puede considerarse por tanto que la enumeración que sigue es una doble bibliografía, ya que no solo está integrada por libros introductorios al estudio de la gran historia y la historia moderna de los orígenes, sino también por textos que abordan algunos de los grandes temas que componen la gran historia.

LIBROS Y ARTÍCULOS

Alvarez, Walter, *A Most Improbable Journey: A Big History of Our Planet and Ourselves*, W. W. Norton, Nueva York, 2016. Un estudio muy personal de la gran historia salido de la pluma del geólogo que mostró lo que un asteroide pudo hacer a los dinosaurios.

Brown, Cynthia Stokes, *Big History: From the Big Bang to the Present*, New Press, Nueva York, 2012[2]. Una versión diferente del relato de la gran historia.

Bryson, Bill, *A Short History of Nearly Everything*, Doubleday, Nueva York, 2003. Una magnífica crónica, y muy fácil de leer, de la evolución que ha experimentado la moderna comprensión científica del universo.

Chaisson, Eric, *Cosmic Evolution: The Rise of Complexity in Nature*. Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 2001. Esta obra ahonda en el vínculo que asocia los flujos de energía y densidad con el incremento de la complejidad.

Christian, David, *Maps of Time: An Introduction to Big History*, University of California Press, Berkeley, 2011[2]. Se trata de uno de los primeros intentos modernos (la primera edición es de 2004) de abordar la narrativa de la gran historia.

—, *This Fleeting World: A Short History of Humanity*, Berkshire Publishing, Great Barrington, Massachusetts, 2008. Breve historia de la humanidad.

—, «What Is Big History?», *Journal of Big History*, vol. 1, n.º 1, 2017, pp. 4-19, disponible en Internet: https://journalofbighistory.org/index.php/jbh.

Christian, David; Stokes Brown, Cynthia y Benjamin, Craig, *Big History: Between Nothing and Everything*, McGraw-Hill, Nueva York, 2014. Manual universitario para informarse sobre la gran historia.

Instituto de Gran Historia de la Universidad de Macquarie, *Big History.* Londres, DK Books, 2016. Una explicación bellamente ilustrada de la narrativa de la gran historia.

Rodrigue, Barry; Grinin, Leonid y Korotayev, Andrey (comps.), *From Big Bang to Galactic Civilizations: A Big History Anthology, vol. 1: Our Place in the Universe*, Primus Books, Delhi, 2015. Antología de ensayos sobre cuestiones propias de la gran historia.

Spier, Fred, *Big History and the Future of Humanity*, Wiley-Blackwell, Malden, Massachusetts, 2015[2]. Un ambicioso intento destinado a poner en tela de juicio algunas de las principales ideas teoréticas en que se apoya la gran historia.

OTRAS FUENTES INTERESANTES PARA EL ESTUDIO DE LA GRAN HISTORIA

Bill Gates financia el Big History Project, un programa gratuito en línea destinado a los estudiantes de instituto. La gran historia cuenta ya con una organización académica propia (la Asociación Internacional de Gran Historia), y la Universidad de Macquarie ha creado un Instituto de Gran Historia para la enseñanza y la investigación avanzadas en este campo.

En 2011 di una conferencia TED (Tecnología, Entretenimiento y Diseño) concebida para presentar al público una breve introducción a la noción de la gran historia. Disponible en Internet: https://www.ted.com/talks/david_christian_big_history.

NOTAS

PREFACIO

1. William H. McNeill, «Mythistory, or Truth, Myth, History, and Historians», *American Historical Review*, vol. 91, n.º 1, febrero de 1986, p. 7.

2. H. G. Wells, *Outline of History: Being a Plain History of Life and Mankind*, Macmillan, Nueva York, 1921[3], p. vi [hay traducción castellana: *Esquema de la historia universal. Historia sencilla de la vida y de la humanidad*, Editorial Anaconda, Buenos Aires, 1952].

3. El destacado biólogo E. O. Wilson ha expuesto con notable elocuencia la crucial importancia de asociar de un modo más estrecho las modernas disciplinas académicas. Véase E. O. Wilson, *Consilience: The Unity of Knowledge*, Abacus, Londres, 1998.

4. La primera vez que empleé este término fue en «The Case for "Big History"», *Journal of World History*, vol. 2, n.º 2, otoño de 1991, pp. 223-238.

Introducción

1. Para saber más acerca de la historia de estos hallazgos y de la muy diferente percepción con que los juzgan los arqueólogos y quienes actualmente viven en las inmediaciones del lago Mungo, véase el maravilloso cortometraje documental de Andrew Pike y Ann McGrath titulado *Message from Mungo*, Ronin Films, 2014.

2. La obra de Mike Smith titulada *The Archaeology of Australia's Deserts* (Cambridge University Press, Cambridge, 2013) explica de forma soberbia las características arqueológicas de la Australia interior.

3. *The Power of Myth*, episodio 2, Bill Moyers y Joseph Campbell, 1988. Disponible en Internet: http://billmoyers.com/content/ep-2-joseph-campbell-and-the-power-of-myth-the-message-of-the-myth/.

4. Walter Alvarez, *A Most Improbable Journey*, W.W. Norton, Nueva York, 2016, p. 33.

5. Cita tomada de Fritjof Capra y Pier Luigi Luisi, *The Systems View of Life: A Unifying Vision*, Cambridge University Press, Cambridge, 2014, p. 280.

6. En Fred Spier, *Big History and the Future of Humanity* (Wiley-Blackwell, Malden, 2015), pp. 63-68 y ss., se analiza exhaustivamente el principio Ricitos de Oro [hay traducción castellana: *El lugar del hombre en el cosmos. La gran historia y el futuro de la humanidad*, Crítica, Barcelona, 2011].

Capítulo 1. En el principio: umbral 1

1. Richard S. Westfall, *The Life of Isaac Newton*, Cambridge University Press, Cambridge, 1993, p. 259 [hay traducción castellana: *Isaac Newton. Una vida*, Akal, Madrid, 2006]. Andando el tiempo, Newton cambiaría de opinión respecto a la idea de un universo entendido como «sistema sensorial» de una entidad divina, pero conservaría en cambio la noción de que Dios se hallaba «omnipresente, en el sentido literal del término».

2. Bertrand Russell, «Why I Am Not a Christian», conferencia pronunciada en el salón de actos de Battersea, Londres, marzo de 1927 [hay traducción castellana: *Por qué no soy cristiano*, Edhasa, Barcelona, 2012].

3. Cita tomada de David Christian, *Maps of Time*, University of California Press, Berkeley, p. 17 [hay traducción castellana: *Mapas del tiempo. Introducción a la «gran historia»*, Crítica, Barcelona, 2012].

4. Deborah Bird Rose, *Nourishing Terrains: Australian Aboriginal Views of Landscape and Wilderness*, Australian Heritage Commission, Canberra, 1996, p. 23.

5. Joseph Campbell, *The Hero with a Thousand Faces*, Princeton University Press, Princeton, Nueva Jersey, 1968[2], p. 261 [hay traducción castellana: *El héroe de las mil caras. Psicoanálisis del mito*, Fondo de Cultura Económica, Madrid, 2015].

6. Stephen Hawking, *A Brief History of Time: From the Big Bang to Black Holes*, Bantam, Londres, 1988 [hay traducción castellana: *Brevísima historia del tiempo*, Crítica, Barcelona, 2005].

7. Quiero agradecer a Elise Bohan que me haya puesto sobre la pista de esta cita de Terry Pratchett, que puede encontrarse en *Lords and Ladies*, Victor Gollancz, Londres, 1992 [hay traducción castellana: *Lores y damas*, Debolsillo, Barcelona, 2004].

8. Para saber más acerca de los paradigmas, véase el clásico texto de Thomas S. Kuhn, *The Structure of Scientific Revolutions*, University of Chicago Press, Chicago, 1970[2] [hay traducción castellana: *La estructura de las revoluciones científicas*, Fondo de Cultura Económica, Madrid, 2017].

9. Peter Atkins, *Chemistry: A Very Short Introduction*, Oxford University Press, Oxford, 2015, loc. 722, Kindle [hay traducción castellana: *¿Qué es la química?*, Alianza, Madrid, 2015].

10. Lawrence Krauss, *A Universe from Nothing: Why There Is Something Rather than Nothing*, Simon and Schuster, Nueva York, 2012.

11. Erwin Schrödinger, *What Is Life?* y *Mind and Matter*, Cambridge University Press, Cambridge, 1967, p. 73 [hay traducciones castellanas: *¿Qué es la vida?*, Tusquets, Barcelona, 1983; y *Mente y materia*, Tusquets, 1983.].

12. Joseph Campbell, *The Hero with a Thousand Faces*, *op. cit.*, pp. 25-26.

13. Peter M. Hoffmann, *Life's Ratchet: How Molecular Machines Extract Order from Chaos*, Basic Books, Nueva York, 2012, loc. 179, Kindle.

14. Para saber más acerca de esta idea, véase Lawrence M. Krauss, *A Universe from Nothing, op. cit*.

Capítulo 2. Estrellas y galaxias: umbrales 2 y 3

1. «Desde el punto de vista molecular, la elevación de un determinado peso se corresponde con el desplazamiento de todos sus átomos en la misma dirección [...]. El trabajo es una transferencia de energía que utiliza el movimiento uniforme de los átomos que se encuentran en las inmediaciones»: Peter Atkins, *Four Laws That Drive the Universe*, Oxford University Press, Oxford, 2007, p. 32 [hay traducción castellana: *Las cuatro leyes del universo*, Espasa Libros, Barcelona, 2008].

2. Véase Eric Chaisson, *Cosmic Evolution. The Rise of Complexity in Nature*, Harvard University Press, Cambridge, 2001, y Fred Spier, *Big History*, *op. cit*.

3. Andrew King, *Stars: A Very Short Introduction*, Oxford University Press, Oxford, 2012, p. 49.

4. *Ibid.*, p. 59.

5. *Ibid*., p. 66.

Capítulo 3. Moléculas y satélites: umbral 4

1. Peter Atkins, *Chemistry: A Very Short Introduction*, *op. cit.*, loc. 788, Kindle.

2. Robert M. Hazen, «Evolution of Minerals», *Scientific American*, marzo de 2010, p. 61.

3. John Chambers y Jacqueline Mitton, *From Dust to Life: The Origin and Evolution of Our Solar System*, Princeton University Press, Princeton, Nueva Jersey, 2014, p. 7.

4. Doug Macdougall, *Why Geology Matters: Decoding the Past, Anticipating the Future*, University of California Press, Berkeley, 2011, p. 4.

5. Doug Macdougall, *Nature's Clocks: How Scientists Measure the Age of Almost Everything*, University of California Press, Berkeley, 2008, pp. 58-60.

6. Tim Lenton, *Earth Systems Science: A Very Short Introduction*, Oxford University Press, Oxford, 2016, loc. 1297, Kindle.

Capítulo 4. Vida: umbral 5

1. Tanto las metáforas como los cálculos que aquí presento proceden del libro de Peter Hoffmann *Life's Ratchet: How Molecular Machines Extract Order from Chaos*, Basic Books, Nueva York, 2012, loc. 238, Kindle.

2. John Holland, *Complexity: A Very Short Introduction*, Oxford University Press, Oxford, 2014, p. 8. Los sistemas adaptativos complejos contienen «elementos que no son fijos. Dichos elementos, habitualmente denominados *agentes*, aprenden o se adaptan en respuesta a las interacciones con otros agentes».

3. Seth Lloyd, *Programming the Universe*, Knopf, Nueva York, 2006, p. 44.

4. Gregory Bateson, según cita tomada de Luciano Floridi, *Information: A Very Short Introduction*, Oxford University Press, Oxford, 2010, loc. 295, Kindle.

5. Daniel C. Dennett, *Kinds of Minds: Towards an Understanding of Consciousness*, Weidenfeld and Nicolson, Londres, 1996, p. 82 [hay traducción castellana: *Tipos de mente. Hacia una compresión de la conciencia*, Debate, Barcelona, 2000].

6. David S. Goodsell, *The Machinery of Life*, Editorial Springer, Nueva York, 2009[2], loc. 700, Kindle.

7. «Todo proceso que genere estructuras aumenta la información potencial intrínsecamente asociada con dicha estructura, y ese incremento se corresponde con una disminución de la entropía (es decir, con la reducción del número de microestados).» Cita tomada de Anne-Marie Grisogono, «(How) Did Information Emerge?», en *From Matter to Life: Information and Causality*, Sara Imari Walker, Paul C. W. Davies y George F. R. Ellis (comps.), Cambridge University Press, Cambridge, 2017, capítulo 4, Kindle.

8. Peter M. Hoffmann, *Life's Ratchet: How Molecular Machines Extract Order from Chaos*, *op. cit.*, loc. 3058, Kindle.

9. Charles Darwin, *The Origin of Species*, Penguin, Nueva York, 1985, pp. 130-131 [hay traducción castellana: *El origen de las especies*, Akal, Madrid, 2013].

10. En Daniel Dennett, *Darwin's Dangerous Idea: Evolution and the Meaning of Life* (Allen Lane, Londres, 1995) se explica magníficamente la fuerza de la idea de Darwin y lo escandalosa que podía llegar a resultar [hay traducción castellana: *La peligrosa idea de Darwin. Evolución y significados de la vida*, Galaxia Gutenberg, Barcelona, 2000].

11. En el capítulo 7 del libro de Jeffrey Bennett y Seth Shostak *Life in the Universe* (Addison-Wesley, Boston, 2011[3]) se ofrece un buen debate sobre las condiciones Ricitos de Oro que surgen en medios químicamente ricos.

12. Véase Daniel C. Dennett, *From Bacteria to Bach: The Evolution of Minds*, Penguin, Nueva York, 2017, p. 48.

13. Revista *Science*, vol. 356, n.º 6334, 14 de abril de 2017, p. 132.

14. Robert M. Hazen, «Evolution of Minerals», *Scientific American*, *op. cit.*, p. 58.

15. Peter Ward y Joe Kirschvink, *A New History of Life: The Radical New Discoveries About the Origins and Evolution of Life on Earth*, Bloomsbury Press, Londres, 2016, pp. 65-66.

16. Allen P. Nutman *et al*., «Rapid Emergence of Life Shown by Discovery of 3,700-Million-Year-Old Microbial Structures», *Nature*, n.º 537, 22 de septiembre de 2016, pp. 535-538, identificador de objeto digital: doi:10.1038/nature19355.

17. Nadia Drake, «This May Be the Oldest Known Sign of Life on Earth», *National Geographic*, 1 de marzo de 2017. Disponible en Internet: http://news.nationalgeographic.com/2017/03/oldest-life-earth-iron-fossils-canada-vents-science/?WT.mc_id=20170606_Eng__bhptw&WT.tsrc=BHPTwitter&linkId=38417333.

18. Madeline C. Weiss *et al*., «The Physiology and Habitat of the Last Universal Common Ancestor», *Nature Microbiology*, n.º 1, artículo n.º 16116, 2016, identificador de objeto digital: doi: 10.1038/nmicrobiol.2016.116.

19. Nick Lane, *Life Ascending: The Ten Great Inventions of Evolution*, W. W. Norton, Nueva York, 2009, loc. 421, Kindle [hay traducción castellana: *Los diez grandes inventos de la evolución*, Ariel, Barcelona, 2015].

20. Terrence Deacon llama «autocélulas» a estas formaciones: véase Anne-Marie Grisogono, «(How) Did Information Emerge?», en *From Matter to Life: Information and Causality*, *op. cit*.

Capítulo 5. La microbiología y la biosfera

1. Para saber más acerca del concepto de biosfera, véase Vaclav Smil, *The Earth's Biosphere: Evolution, Dynamics, and Change*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 2002, así como el trabajo, adelantado a su época [publicado originalmente en ruso, en 1926, de Vladimir Vernadsky: *The Biosphere*, Copernicus, Gotinga, Alemania, 1998, prologado por Lynn Margulis [hay traducción castellana: *La biosfera*, Machado Grupo de Distribución, Madrid, 1997]. Para un breve resumen de la historia de la biosfera, véase también Mark Williams *et al*., «The Anthropocene Biosphere», *Anthropocene Review*, 2015, pp. 1-24, identificador de objeto digital: doi: 10.1177/2053019615591020.

2. David Christian, Craig Benjamin y Cynthia Brown, *Big History: Between Nothing and Everything*, McGraw-Hill Education, Nueva York, p. 46.

3. Andrea Wulf, *The Invention of Nature: The Adventures of Alexander von Humboldt, the Lost Hero of Science*, John Murray, Londres, 2015, loc. 2368, Kindle [hay traducción castellana: *La invención de la naturaleza. El nuevo mundo de Alexander von Humboldt*, Taurus, Barcelona, 2017].

4. Jeffrey Bennett y Seth Shostak, *Life in the Universe*, Addison-Wesley, Boston, 2011[3], p. 130.

5. Robert M. Hazen, «Evolution of Minerals», *Scientific American*, *op. cit.*, p. 63.

6. Jeffrey Bennett y Seth Shostak *Life in the Universe*, *op. cit.*, p. 134.

7. David Grinspoon, *Earth in Human Hands: Shaping Our Planet's Future*, Grand Central Publishing, Nueva York, 2016, p. 204.

8. Véase *ibid*., pp. 44 y ss., para un debate sobre estos mecanismos.

9. Peter Ward y Joe Kirschvink, *A New History of Life: The Radical New Discoveries About the Origins and Evolution of Life on Earth*, *op. cit.*, p. 64.

10. Dennis Bray, *Wetware: A Computer in Every Living Cell*, Yale University Press, New Haven, 2009, loc. 1084, Kindle.

11. Esta descripción puede encontrarse en Gerhard Roth, *The Long Evolution of Brains and Minds*, Springer, Nueva York, 2013, p. 70.

12. Véase Andrew Knoll, *Life on a Young Planet: The First Three Mil Billion Years of Evolution on Earth*, Princeton University Press, Princeton, 2003, p. 20. Este libro explica magníficamente la asombrosa diversidad de los sistemas metabólicos de los procariotas. Para saber más acerca de los flujos de energía que explotaban los primeros microorganismos, véase también Olivia P. Judson, «The Energy Expansions of Evolution», *Nature: Ecology and Evolution*, n.º 28, abril de 2017, pp. 1-9.

13. Tim Lenton, *Earth Systems Science: A Very Short Introduction*, *op. cit.*, p. 18.

14. *Ibid*., loc. 1344, Kindle.

15. Robert M. Hazen, «Evolution of Minerals», *Scientific American*, *op. cit.*, p. 63.

16. Tim Lenton, *Earth Systems Science: A Very Short Introduction*, *op. cit.*, loc. 1418, Kindle.

17. Donald E. Canfield, *Oxygen: A Four Billion Year History*, Princeton University Press, Princeton, 2014, loc. 893, Kindle [hay traducción castellana: *Oxígeno. Una historia de cuatro mil millones de años*, Crítica, Barcelona, 2015].

18. Tim Lenton, *Earth Systems Science*, *op. cit.*, loc. 1438, Kindle.

19. Gerhard Roth, *The Long Evolution of Brains and Minds*, *op. cit.*, pp. 73-75.

Capítulo 6. La macrobiología y la biosfera

1. Michael J. Benton, *The History of Life: A Very Short Introduction*, Oxford University Press, Oxford, 2008, loc. 766, Kindle. Véase también Dennis Bray, *Wetware: A Computer in Every Living Cell*, Yale University Press, New Haven, 2009, loc. 2008 y ss., Kindle.

2. Siddhartha Mukherjee, *The Gene: An Intimate History*, Scribner, Nueva York, 2016, loc. 5797, Kindle [hay traducción castellana: *El gen. Una historia personal*, Editorial Debate, Barcelona, 2017].

3. Sean B. Carroll, *Endless Forms Most Beautiful: The New Science of Evo Devo and the Making of the Animal Kingdom*, Weidenfeld and Nicolson, Londres, 2011, pp. 71 y ss.

4. Buena parte del debate que expongo a continuación se basa en el texto de Peter Ward y Joe Kirschvink titulado *A New History of Life: The Radical New Discoveries About the Origins and Evolution of Life on Earth*, *op. cit*., capítulo 7.

5. Doug Macdougall, *Why Geology Matters: Decoding the Past, Anticipating the Future*, *op. cit.*, p. 132.

6. Peter Ward y Joe Kirschvink, *A New History of Life*, *op. cit.*, p. 119.

7. *Ibid.*, p. 124.

8. Niles Eldredge y Stephen Jay Gould, «Punctuated Equilibria: An Alternative to Phyletic Gradualism», en *Models in Paleobiology*, T. J. M. Schopf (comp.), Freeman Cooper, San Francisco, 1972, pp. 82-115.

9. Stephen Jay Gould escribió un espléndido libro —aunque muy controvertido— sobre los fósiles del esquisto de Burgess: *Wonderful Life: The Burgess Shale and the Nature of History*, Hutchinson, Londres, 1989 [hay traducción castellana: *La vida maravillosa. Burgess Shale y la naturaleza de la historia*, Crítica, Barcelona, 1995].

10. Esa es la expresión que emplean Peter Ward y Joe Kirschvink en *A New History of Life*, *op. cit.*, p. 222.

11. Tim Lenton, *Earth Systems Science: A Very Short Introduction*, *op. cit.*, p. 44.

12. *Ibid.*, p. 48: «Durante el Fanerozoico, el cambio más acusado que registró el contenido de dióxido de carbono de la atmósfera se debió a las plantas colonizaron la tierra firme. Este proceso comenzó hace aproximadamente 470 millones de años y entró en una espiral ascendente con los primeros bosques, hace 360 millones de años. Se estima que la subsiguiente aceleración de los procesos de alteración de los silicatos redujo en un orden de magnitud la concentración del dióxido de carbono atmosférico y enfrió el planeta hasta el punto de provocar varias glaciaciones a lo largo de los períodos Carbonífero y Pérmico».

13. *Ibid.*, p. 72.

14. Para más información acerca de la relación entre la subducción del carbono y los valores de oxígeno de la atmósfera, véase *ibid*., p. 24. Robert M. Hazen, en «Evolution of Minerals» (*Scientific American*, marzo de 2010, p. 58), argumenta que hace unos cuatrocientos millones de años, la Tierra ya contaba con el complemento de esos minerales, de más de cuatro mil clases diferentes.

15. Gerhard Roth, *The Long Evolution of Brains and Minds*, *op. cit.*, p. 229.

16. Daniel Cossins, «Why Do We Seek Knowledge?», *New Scientist*, 1 de abril, 2017, p. 33.

17. En *Self Comes to Mind: Constructing the Conscious Mind*, Cornerstone Digital, Calgary, Alberta, 2011, el neurocientífico Antonio Damasio argumenta que nuestra conciencia es un elemento inherentemente presente en este proceso de cartografiado de la realidad que, además de hallarse en constante mutación, se inicia con la elaboración de mapas táctiles, visuales y emocionales de nuestro propio cuerpo.

18. Dylan Evans, *Emotion: A Very Short Introduction*, Oxford University Press, Oxford, 2001, loc. 334, Kindle [hay traducción castellana: *Emoción*, Taurus, Barcelona, 2002].

19. Gerhard Roth, *The Long Evolution of Brains and Minds*, *op. cit.*, pp. 15-16.

20. *Ibid.*, pp. 162-163.

21. Para la exposición de lo que sucedió he seguido muy de cerca la descripción que nos ha dejado del acontecimiento Walter Alvarez, el geólogo que demostró que lo que había borrado de la faz de la Tierra a los dinosaurios había sido justamente el impacto de un asteroide. Véase el magnífico libro en el que Alvarez refiere el acontecimiento, titulado *T. Rex and the Crater of Doom*, Nueva York, Vintage, 1998 [hay traducción castellana: *Tyrannosaurus rex y el cráter de la muerte*, Crítica, Barcelona, 2009].

22. *Science News*. Disponible en Internet: https://www.sciencenews.org/article/devastation-detectives-try-solve-dinosaur-disappearance.

23. Stephen Brusatte y Zhe-Xi Luo, «Ascent of the Mammals», *Scientific American*, junio de 2016, pp. 20-27.

24. Peter Ward y Joe Kirschvink, *A New History of Life*, *op. cit.*, p. 315.

25. *Ibid.*, p. 316.

Capítulo 7. Seres humanos: umbral 6

1. Esto se argumenta con notable elocuencia en David Grinspoon, *Earth in Human Hands: Shaping Our Planet's Future*, Grand Central Publishing, Nueva York, 2016.

2. Robin Dunbar, *The Human Story: A New History of Mankind's Evolution*, Faber and Faber, Londres, 2004, p. 71 [hay traducción castellana: *La odisea de la humanidad. Una nueva historia de la evolución de la raza humana*, Crítica, Barcelona, 2007].

3. Gerhard Roth, *The Long Evolution of Brains and Minds*, *op. cit.*, p. 226.

4. Es un chiste bastante viejo. Topé con él en Daniel C. Dennett, *Consciousness Explained*, Penguin, Londres, 1991, p. 177 [hay traducción castellana: *La conciencia explicada. Una teoría interdisciplinar*, Paidós, Barcelona, 1995]. Dennett atribuye esta comparación al neurocientífico estadounidense de origen colombiano Rodolfo Llinás.

5. Para saber más sobre esta última idea, véase Michael S. A. Graziano, *Consciousness and the Social Brain*, Oxford University Press, Oxford, 2013.

6. Las obras de Frans de Waal y Jane Goodall se adentraron hace tiempo en las complejas realidades de la vida política de los simios y los monos. En fechas más recientes se ha seguido ahondando en este tipo de estudios, lo que ha dado lugar a obras como la de Dorothy L. Cheney y Robert M. Seyfarth titulada *Baboon Metaphysics: The Evolution of a Social Mind*, University of Chicago Press, Chicago, 2007, en la que se analizan las relaciones sociales que se dan en las comunidades de babuinos.

7. Véase Christopher Seddon, *Humans: From the Beginning*, Glanville Books, Nueva York, 2014, pp. 42-45.

8. Para saber más acerca del EQ, véase *ibid*., p. 225 y ss., junto con Gerhard Roth, *The Long Evolution of Brains and Minds*, *op. cit*., p. 232.

9. Gerhard Roth, *The Long Evolution of Brains and Minds*, *op. cit.*, p. 228.

10. Para más información acerca de la correlación entre el tamaño del cerebro y las dimensiones de los grupos, véase John Gowlett, Clive Gamble y Robin Dunbar, «Human Evolution and the Archaeology of the Social Brain», *Current Anthropology*, vol. 53, n.º 6, diciembre de 2012, pp. 695-696.

11. *New Scientist*, 29 de abril de 2017, p. 10.

12. Robin Dunbar, *Human Evolution*, Penguin, Nueva York, 2014, p. 163.

13. John Gowlett, Clive Gamble y Robin Dunbar, «Human Evolution and the Archaeology of the Social Brain», *Current Anthropology*, vol. 53, n.º 6, *op. cit.*, pp. 695-696.

14. Michael Tomasello, *The Cultural Origins of Human Cognition*, Cambridge, Massachusetts, Harvard University Press, 1999, loc. 39, Kindle.

15. Véase James R. Hurford, *The Origins of Language: A Slim Guide*, Oxford University Press, Oxford, 2014, p. 68; junto con Dorothy L. Cheney y Robert M. Seyfarth, *Baboon Metaphysics: The Evolution of a Social Mind*, loc. 2408, Kindle: «Las pruebas de un auténtico proceso de enseñanza entre primates no humanos [...] puede resumirse en una sola palabra: escasas».

16. Michael Tomasello, *The Cultural Origins of Human Cognition*, *op. cit.*, loc. 5, Kindle: «La fiel transmisión de los contenidos sociales [...] puede operar a modo de trinquete y evitar así que lo adquirido acabe revirtiendo —y de esa forma, una práctica o un artefacto recién inventados conservarán con cierta fidelidad tanto sus características innovadoras como las ulteriores mejoras que puedan experimentar, al menos en tanto no surja una nueva modificación—». Tomasello da a este proceso el nombre de «aprendizaje colaborativo».

17. Steven Pinker, *The Sense of Style: The Thinking Person's Guide to Writing in the Twenty-First Century*, Penguin, Nueva York, 2015, p. 110.

18. Esta es la idea que sugiere Gerhard Roth en *The Long Evolution of Brains and Minds*, *op. cit*., p. 264. Para saber más acerca de la capacidad de recordar un gran número de palabras, exclusiva de los seres humanos, véase James R. Hurford, *The Origins of Language: A Slim Guide*, *op. cit*., p. 119.

19. Véase Terrence Deacon, *The Symbolic Species: The Co-Evolution of Language and the Brain*, W. W. Norton, Nueva York, 1998; junto con Michael Tomasello, *Why We Cooperate*, Cambridge, Massachusetts, MIT Press, 2009 [hay traducción castellana: *¿Por qué cooperamos? Con la participación de Carol Dweck, Joan Silk, Brian Skyrms y Elizabeth Spelke*, Katz Editores, Madrid, 2011]. Para un análisis reciente de la evolución del lenguaje, véase William Tecumseh Fitch, *The Evolution of Language*, Cambridge University Press, Cambridge, 2010; así como Peter J. Richerson y Robert Boyd, «Why Possibly Language Evolved», *Biolinguistics*, vol. 4, n.os 2/3, 2010, pp. 289-306. El libro de Alex Mesoudi titulado *Cultural Evolution: How Darwinian Theory Can Explain Human Culture and Synthesize the Social Sciences*, University of Chicago Press, Chicago, 2011, es un excelente estudio panorámico, perfectamente actualizado, del vasto *corpus* de investigación surgido de la comprensión darwiniana del cambio cultural.

20. Eric R. Kandel, *In Search of Memory: The Emergence of a New Science of Mind*, W. W. Norton, Nueva York, 2006, loc. 330, Kindle [hay traducción castellana: *En busca de la memoria. Una nueva ciencia de la mente*, Katz Editores, Madrid, 2007].

21. William H. McNeill, «*The Rise of the West* After Twenty-Five Years», *Journal of World History*, vol. l, n.º 1, 1990, p. 2.

22. Sally McBrearty y Alison S. Brooks, «The Revolution That Wasn't: A New Interpretation of the Origin of Modern Human Behavior», *Journal of Human Evolution*, n.º 39, 2000, pp. 453-563.

23. Este símil se encuentra en el libro de Peter J. Richerson y Robert Boyd titulado *Not by Genes Alone: How Culture Transformed Human Evolution*, University of Chicago Press, Chicago, 2005, p. 139.

24. Robin Dunbar, *Human Evolution*, *op. cit.*, p. 13.

25. Puede consultarse la interesante y breve visión de conjunto que ofrece Chris Scarre (comp.), en *The Human Past: World Prehistory and the Development of Human Societies*, Thames and Hudson, Londres, 2005, pp. 143-145.

26. Peter Hiscock, «Colonization and Occupation of Australasia», en Merry Wiesner-Hanks (comp.), *Cambridge World History*, vol. 1, Cambridge University Press, Cambridge, 2015, p. 452.

27. Peter Bellwood describe estupendamente estos movimientos de población en *First Migrants: Ancient Migration in Global Perspective*, Wiley-Blackwell, Malden, 2013.

28. Para saber más sobre la modelización de esta dispersión inicial, véase Peter Hiscock, «Colonization and Occupation of Australasia», en Merry Wiesner-Hanks (comp.), *Cambridge World History*, vol. 1, *op. cit.*, pp. 433-438.

29. Las cifras proceden de David Christian, *Maps of Time*, *op. cit.*, p. 143.

30. Marshall Sahlins, «The Original Affluent Society», *Stone Age Economics*, Tavistock, Londres, 1972, pp. 1-39 [hay traducción castellana: *Economía de la Edad de Piedra*, Akal, Madrid, 2015].

Capítulo 8. Agricultura y ganadería: umbral 7

1. Vaclav Smil, *Harvesting the Biosphere: What We Have Taken from Nature*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 2013.

2. Jared Diamond expone esta idea del experimento natural en el capitulo final de su libro *Guns, Germs, and Steel: The Fates of Human Societies*, Vintage, Londres, 1998 [hay traducción castellana: *Armas, gérmenes y acero. Breve historia de la humanidad en los últimos trece mil años*, Editorial Debate, Barcelona, 2004].

3. Disponible en Internet: http://www.theaustralian.com.au/national-affairs/indigenous/aborigines-were-building-stone-houses-9000-yearsago/news-story/30ef4873a7c8aaa2b80d01a12680df77.

4. Puede encontrarse un estupendo y reciente estudio de conjunto sobre la transformación que han experimentado los roles de género en el transcurso de la historia de la humanidad en Merry E. Wiesner-Hanks, *Gender in History: Global Perspectives,* Wiley-Blackwell, Malden, 2011[2].

5. Marc Cohen, *The Food Crisis in Prehistory*, Yale University Press, New Haven, 1977, p. 65: «En todo el mundo, los grupos humanos irían viéndose forzados a abrazar la agricultura, y separados tan solo por diferencias cronológicas de apenas unos cuantos miles de años».

6. Chris Scarre (comp.), *The Human Past: World Prehistory and the Development of Human Societies*, *op. cit.*, pp. 214-215.

7. En su libro *Dark Emu: Black Seeds: Agriculture or Accident?* (Magabala Books, Broome, Australia, 2014), Bruce Pascoe explica muchas de las técnicas de cultivo que empleaban los indígenas australianos: las hoces aparecen descritas en loc. p. 456, Kindle.

8. Es el argumento central del espléndido trabajo de Jared Diamond *Guns, Germs, and Steel*, *op. cit*.

9. Peter Bellwood, *First Migrants: Ancient Migration in Global Perspective*, Wiley-Blackwell, Malden, 2013, *op. cit*., p. 124.

10. Vaclav Smil, *Harvesting the Biosphere: What We Have Taken from Nature*, *op. cit.*, 2075, Kindle.

11. Merry Wiesner-Hanks (comp.), *Cambridge World History,* vol. 2, Cambridge University Press, Cambridge, 2015, *op. cit*., pp. 221, 224-228.

12. Robin Dunbar, *Human Evolution*, *op. cit.*, p. 77.

Capítulo 9. Las civilizaciones agrarias

1. Richard Lee, «What Hunters Do for a Living, or, How to Make Out on Scarce Resources», en Richard Lee e Irven DeVore (comps.), *Man the Hunter*, Aldine, Chicago, 1968.

2. Chris Scarre (comp), *The Human Past: World Prehistory and the Development of Human Societies*, *op. cit.*, p. 403.

3. Este documento aparece citado en Alfred J. Andrea y James H. Overfield, *The Human Record: Sources of Global History,* vol. 1, Wadsworth, Boston, 2008[4], pp. 23-24.

4. Cita tomada de Robert C. Tucker (comp.), *The Marx-Engels Reader*, W. W. Norton, Nueva York, 1978[2], p. 608. [Puede consultarse en castellano: *El dieciocho brumario de Luis Bonaparte*, capítulo VII.]

5. Hans J. Nissen, «Urbanization and the Techniques of Communication: The Mesopotamian City of Uruk During the Fourth Millennium BCE», en Merry Wiesner-Hanks (comp.), *Cambridge World History,* vol. 3, Cambridge University Press, Cambridge, 2015, *op. cit*., pp. 115-116.

6. Mark McClish y Patrick Olivelle (comps.), *The Arthasastra: Selections from the Classic Indian Work on Statecraft*, Hackett Publishing, Indianápolis, 2012, secciones 1.4.13-15, Kindle.

7. *Ibid*., secciones 1.4.1.-1.4.4, 1.5.1.

8. *Ibid*., sección 2.36.3.

9. *Ibid*., sección 2.35.4.

10. Thomas Piketty, *Capital in the Twenty-First Century*, traducción inglesa de Arthur Goldhammer, Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 2014, p. 270 y p. 258, tabla 7.2 [hay traducción castellana: *El capital en el siglo XXI*, Fondo de Cultura Económica, Madrid, 2014].

Capítulo 10. A las puertas del mundo actual

1. Grace Karskens, *The Colony: A History of Early Sydney*, Allen and Unwin, Nueva Gales del Sur, 2009, loc. 756-779, Kindle.

2. La intensa búsqueda global de nuevos recursos aparece magníficamente descrita en la obra de John Richards titulada *The Unending Frontier: Environmental History of the Early Modern World*, University of California Press, Berkeley, 2006.

3. Alfred W. Crosby, *Ecological Imperialism: The Biological Expansion of Europe, 900-1900*, Cambridge University Press, Cambridge, 1986 [hay traducción castellana: *Imperialismo ecológico. La expansión biológica de Europa, 900-1900*, Crítica, Barcelona, 1998].

4. Felipe Fernández-Armesto, *Pathfinders: A Global History of Exploration*, W. W. Norton, Nueva York, 2007, pp. 161 y ss. [hay traducción castellana: *Los conquistadores del horizonte. Una historia global de la exploración*, Ariel, Barcelona, 2012].

5. David Wootton, *The Invention of Science: A New History of the Scientific Revolution*, Penguin, Nueva York, 2015, p. 68 [hay traducción castellana: *La invención de la ciencia. Una nueva historia de la revolución científica*, Crítica, Barcelona, 2017].

6. Cita tomada de Steven J. Harris, «Long-Distance Corporations, Big Sciences, and the Geography of Knowledge», *Configurations*, n.º 6, 1998, p. 269.

7. David Wootton, *The Invention of Science: A New History of the Scientific Revolution*, *op. cit.*, p. 37.

8. *Ibid*., p. 54.

9. *Ibid*., p. 35.

10. *Ibid.*, pp. 5-6, 8-9.

11. Margaret Jacob y Larry Stewart, *Practical Matter; Newton's Science in the Service of Industry and Empire, 1687-1851*, Cambridge, Massachusetts, Harvard University Press, 2004, p. 16.

12. David Christian, *«Living Water»: Vodka and Russian Society on the Eve of Emancipation*, Oxford University Press, Oxford, 1990.

13. E. A. Wrigley, *Energy and the English Industrial Revolution*, Cambridge University Press, Cambridge, 2011, loc. 298-306, Kindle. Thomas Malthus, William S. Jevons, David Ricardo y John Stuart Mill también aceptaban la idea de que el mundo natural establece límites al crecimiento: véase el debate sobre el particular en Donald Worster, *Shrinking the Earth: The Rise and Decline of American Abundance*, Oxford University Press, Oxford, 2016, pp. 44-49.

14. Alfred W. Crosby, *Children of the Sun: A History of Humanity's Unappeasable Appetite for Energy*, W. W. Norton, Nueva York, 2006, p. 60.

15. E. A. Wrigley, *Energy and the English Industrial Revolution*, *op. cit.*, loc. 2112, Kindle.

16. Para más información acerca del dispositivo ideado por Newcomen y su relación con la revolución científica, véase David Wootton, *The Invention of Science: A New History of the Scientific Revolution*, *op. cit.*, cap. 14.

17. E. A. Wrigley, *Energy and the English Industrial Revolution*, *op. cit*., loc. 2112, Kindle.

18. Daniel Yergin, *The Prize: The Epic Quest for Oil, Money, and Power*, Free Press, Nueva York, 1991, cap. 1 [hay traducción castellana: *Historia del petróleo*, Actualidad y Libros, Barcelona, 1992].

19. *Ibid.*, p. 16.

CAPÍTULO 11. EL ANTROPOCENO: UMBRAL 8

1. Graham Allison y Philip Zelikow, *Essence of Decision: Explaining the Cuban Missile Crisis*, Longman, Nueva York, 1999[2], p. 271.

2. Angus Maddison, *The World Economy: A Millennial Perspective*, Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos, París, 2001, p. 127 [hay traducción castellana: *La economía mundial. Una perspectiva milenaria*, Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, 2002].

3. Tim Lenton, *Earth Systems Science: A Very Short Introduction*, *op. cit.*, p. 82.

4. Datos tomados de Ha-Joon Chang, *Economics: The User's Guide*, Pelican, Nueva York, 2014, p. 429, quien se basa a su vez en las cifras que ofrece el Banco Mundial.

5. Tim Lenton, *Earth Systems Science*, *op. cit.*, pp. 82 y 96-97.

6. El científico al que me refiero es Wally Broecker. La cita procede de David Christian, «Anthropocene Epoch», en Ray Anderson *et al*. (comps.), *The Berkshire Encyclopedia of Sustainability*, vol. 10: *The Future of Sustainability*, Barrington, Berkshire Publishing, 2012, p. 22.

7. Jan Zalasiewicz y Colin Waters, «The Anthropocene», en *The Oxford Research Encyclopedia. Environmental Science*, Oxford University Press, Oxford, 2015, pp. 4-5.

CAPÍTULO 12. ¿Y ADÓNDE NOS LLEVA TODO ESTO?

1. La trilogía marciana de Kim Stanley Robinson (*Red Mars*, 1993, *Green Mars*, 1994 y *Blue Mars*, 1996) ofrece una variada y vívida crónica de lo que podría suponer, desde el punto de vista de la ciencia ficción, la colonización de Marte [hay traducciones castellanas: *Marte rojo*; *Marte verde*; *Marte azul*, Ediciones Minotauro, Barcelona, 2008].

2. Joseph Campbell, *The Hero with a Thousand Faces*, *op. cit.*, p. 46.

3. John Stuart Mill, «Of the "Stationary State"», en *The Principles of Political Economy*, Google Books, disponible en Internet: http://www.efm.bris.ac.uk/het/mill/book4/bk4ch06 [hay traducción castellana: *Principios de Economía Política*, Fondo de Cultura Económica, México, 1971].

4. Johan Rockström *et al*., «A Safe Operating Space for Humanity», *Nature*, n.º 461, 24 de septiembre de 2009, pp. 472-475; actualizado en Will Steffen *et al*., «Planetary Boundaries: Guiding Human Development on a Changing Planet», *Science*, enero de 2015, pp. 1-15.

5. Will Steffen *et al*., «Planetary Boundaries: Guiding Human Development on a Changing Planet», *Science*, *op. cit*., p. 1.

6. La idea de un Antropoceno maduro se estudia en profundidad en David Grinspoon, *Earth in Human Hands: Shaping Our Planet's Future*, Grand Central Publishing, Nueva York, 2016. También he tomado prestadas algunas de las ideas que expongo en este apartado de Paul Raskin, *Journey to Earthland: The Great Transition to Planetary Civilization*, Tellus Institute, Boston, 2016.

7. He sacado los detalles de la crónica que expongo a continuación del espléndido libro de Sean Carroll *The Big Picture: On the Origins of Life, Meaning, and the Universe Itself*, Dutton, Nueva York, 2016, loc. 878, Kindle.

* Se trata de una clara alusión a la fábula moralizante europea que a continuación se menciona, pero el término *Goldilocks* ha empezado a quedar en desuso, sustituido por la más lógica y explícita referencia a la propia parábola. (*N. del t.*)

* Alusión a la conocida campaña publicitaria de las pilas estadounidenses Energizer en la que aparece ese animal como infatigable mascota de la empresa. (*N. del t.*)

* Marca registrada de una pasta alimenticia salada elaborada con extracto de levadura muy popular en Australia y Nueva Zelanda. Es una importante fuente de vitamina B. (*N. del t.*)

* Crítica, Barcelona, 2018. (*N. del t.*)

* El conjunto de los seres vivos pertenecientes a un grupo o una región dados. (*N. del t.*)

* Que sin embargo es tóxica si no se cocina. (*N. del t.*)

* *Op. cit.*, capítulo XXIV. (*N. del t.*)

* *El poema de Gilgamesh*, Cátedra, Madrid, 2015. (*N. del t.*)

* *Op. cit.*, Introducción. (*N. del t.*)

* *Op. cit.*, capítulo I, «Burgueses y proletarios». (*N. del t.*)

* Disponible en Internet: http://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/70/L.1&Lang=S. (*N. del t.*)

** Disponible en Internet: https://unfccc.int/files/meetings/paris_nov_2015/application/pdf/paris_agreement_spanish_.pdf. (*N. del t.*)

* *Id. loc.* (*N. del t.*)

* Empresa estadounidense radicada en Virginia que produce y comercializa distintos cursos de audio y vídeo de nivel universitario. (*N. del t.*)

La gran historia de todo
Desde el Big Bang a las primeras estrellas, nuestro sistema solar, la vida en la Tierra, los dinosaurios, el Homo sapiens*, la agricultura, la Edad de Hielo, los imperios, los combustibles fósiles, el alunizaje y la globalización masiva. Y lo que el futuro nos depara*...
David Christian

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

Título original: *Origin Story. A Big History of Everything*

© 2018 by David Christian. All rights reserved.

© de la traducción, Tomás Fernández Aúz, 2019

© del diseño de la portada, Penguin Random House Group, 2018

© Editorial Planeta S. A., 2019
Av. Diagonal, 662-664, 08034 Barcelona (España)
Crítica es un sello editorial de Editorial Planeta, S. A.
www.ed-critica.es
www.planetadelibros.com

Primera edición en libro electrónico (epub): marzo de 2019

ISBN: 978-84-9199-088-8 (epub)

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