

# EN EL FUTURO

PERSPECTIVAS PARA LA HUMANIDAD

MARTIN  
REES

Lectulandia

La humanidad ha alcanzado una situación crítica. El mundo que conocemos cambia a gran velocidad; durante el próximo siglo nos enfrentaremos a riesgos existenciales que acarrearán varias consecuencias, unas buenas, y otras, malas. Nuestro futuro dependerá de cómo nos planteemos ahora los actos del mañana; los avances en campos como la Biotecnología, la Cibertecnología, la Robótica y la Inteligencia artificial, si se usan con sabiduría, pueden ayudarnos a superar obstáculos como el cambio climático o la perspectiva de una guerra nuclear. Rees nos recuerda que no hay «plan B» para nuestro planeta: no disponemos de alternativas a la Tierra si no cuidamos de ella.

Martin Rees

# **En el futuro: perspectivas para la humanidad**

ePub r1.0

Un\_Tal\_Lucas 09.05.2020

Título original: *On The Future. Prospects For Humanity*  
Martin Rees, 2018  
Traducción: Joandomènec Ros

Editor digital: Un\_Tal\_Lucas  
ePub base r2.1



# Índice de contenido

Prefacio

Introducción. Un pequeño papel cósmico

## 1. De lleno en el Antropoceno

- Peligros y perspectivas
- Amenazas nucleares
- Amenazas ecológicas y puntos de inflexión
- Mantenerse dentro de los límites planetarios
- El cambio climático
- Energía limpia (¿y un «plan B»?)

## 2. El futuro de la humanidad en la Tierra

- Biotecnología
- Cibertecnología, robótica e IA
- ¿Y qué hay de nuestros puestos de trabajo?
- ¿Inteligencia de nivel humano?
- ¿Riesgos verdaderamente existenciales?

## 3. La humanidad en una perspectiva cósmica

- La tierra en un contexto cósmico
- Más allá de nuestro sistema solar
- Vuelos espaciales, tripulados y no tripulados
- ¿Hacia una era poshumana?
- ¿Inteligencia extraterrestre?

## 4. Los límites y el futuro de la ciencia

- De lo simple a lo complejo
- Dar sentido a nuestro mundo complejo
- ¿Cuán lejos se extiende la realidad física?
- ¿Acaso la ciencia «dará un frenazo»?
- ¿Y qué hay de dios?

## 5. Conclusiones

- Haciendo ciencia
- La ciencia en sociedad
- Esperanzas y temores compartidos

# PREFACIO

Este es un libro sobre el futuro. Escribo desde una perspectiva personal, y de tres maneras: como científico, como ciudadano y como miembro preocupado de la especie humana. El hilo conductor del libro es que la prosperidad de la población del mundo, que va en aumento, depende de la sabiduría con la que se haga uso de la ciencia y la tecnología.

Los jóvenes de hoy en día pueden esperar vivir hasta el final del siglo. Así pues, ¿cómo pueden asegurar que tecnologías cada vez más potentes (biotecnología, cibertecnología e inteligencia artificial) puedan abrir un futuro benigno, sin aspectos negativos amenazadores y catastróficos? Lo que está en juego es más importante que nunca; lo que ocurra en este siglo se hará sentir durante miles de años. Al abordar este tema tan amplio soy consciente de que incluso los expertos tienen un récord pobre en lo que a predicción se refiere. Pero soy contumaz porque es fundamental acentuar el discurso público y político acerca de las tendencias científicas y globales a largo plazo.

Los temas de este libro han evolucionado y se han clarificado mediante conferencias para públicos variados, entre ellas las Conferencias Reith de la BBC en 2010, publicadas como *From Here to Infinity*<sup>[1]</sup>. Por ello estoy agradecido por los comentarios de oyentes y lectores. Y reconozco con especial gratitud la información que he recibido (lo supieran o no) de amigos y colegas con experiencia especializada, y que no se citan específicamente en el texto. Entre ellos se cuentan (por orden alfabético): Partha Dasgupta, Stu Feldman, Ian Golden, Demis Hassabis, Hugh Hunt, Charlie Kennel, David King, Seán Ó hÉigearthaigh, Catharine Rhodes, Richard Roberts, Eric Schmidt y Julius Weitzdorfer.

Estoy especialmente en deuda con Ingrid Gnerlich, de Princeton University Press, por instigar el libro y por sus consejos mientras yo lo escribía. También estoy agradecido a Dawn Hall por la corrección de pruebas, a Julie Shawvan por el índice, a Chris Ferrante por el diseño del texto, y a Jill Harris, Sara Henning-Stout, Alison Kalett, Debra Liese, Donna Liese, Arthur Werneck y Kimberley Williams, de Princeton University Press, por su eficiencia a la hora de supervisar el libro a lo largo del proceso de publicación.

# INTRODUCCIÓN

## UN PEQUEÑO PAPEL CÓSMICO

Suponga el lector que los extraterrestres existen, y que algunos de ellos hubieran estado observando nuestro planeta durante los cuarenta y cinco millones de siglos de su existencia. ¿Qué habrían visto? Durante la mayor parte de este vasto espacio de tiempo, el aspecto de la Tierra se habría alterado de manera muy gradual. Los continentes derivaban; la cubierta de hielo crecía y se reducía; aparecieron especies sucesivas, evolucionaron y se extinguieron.

Pero en solo una minúscula rebanada de la historia de la Tierra (los últimos cien siglos), las pautas de la vegetación se alteraron mucho más deprisa que antes. Esto señalaba el inicio de la agricultura, y después de la urbanización. Los cambios se aceleraron a medida que las poblaciones humanas crecían.

Después hubo cambios incluso más rápidos. En solo cincuenta años, la cantidad de dióxido de carbono en la atmósfera empezó a aumentar de forma anormalmente rápida. Y ocurrió algo que carecía totalmente de precedentes: cohetes lanzados desde la superficie del planeta escaparon por completo de la biosfera. Algunos se impulsaron hasta órbitas alrededor de la Tierra; otros viajaron hasta la Luna y otros planetas.

Los hipotéticos extraterrestres sabrían que la Tierra se caldearía gradualmente, y que se enfrentaría a la catástrofe al cabo de unos seis mil millones de años, cuando el Sol estallara y muriera. Pero ¿habrían podido predecir esta «fiebre» repentina a medio camino de su vida, estas alteraciones inducidas por los humanos, que al parecer se producían con una velocidad desenfrenada?

Si continuaran vigilando, ¿qué presenciarían en el próximo siglo? ¿Acaso un espasmo final al que seguiría el silencio? ¿O bien se estabilizaría la ecología del planeta? ¿Y podría ser que una flota de cohetes lanzados desde la Tierra generara nuevos oasis de vida en otros lugares?

Este libro ofrece algunas esperanzas, temores y conjeturas acerca de lo que nos aguarda. Sobrevivir a este siglo y sostener el futuro a más largo plazo de nuestro mundo cada vez más vulnerable depende de acelerar algunas

tecnologías, pero de refrenar responsablemente otras. Los retos a la gobernabilidad son enormes y abrumadores. Ofrezco una perspectiva personal: escribo en parte como científico (como astrónomo), pero también como miembro inquieto de la raza humana.

Para los europeos de la Edad Media, toda la cosmología (desde la creación al apocalipsis) abarcaba solo unos pocos miles de años. Ahora consideramos períodos de tiempo un millón de veces más largos. Pero incluso en esta perspectiva enormemente extendida, este siglo es especial. Es el primero en el que una especie, la nuestra, ostenta tanto poder y es tan dominante que tiene el futuro del planeta en sus manos. Hemos entrado en una época a la que algunos geólogos denominan Antropoceno.

Los antiguos se sentían desconcertados e indefensos frente a las inundaciones y las pestes, y eran propensos al pavor irracional. Grandes partes de la Tierra eran *terra incognita*. El cosmos de los antiguos era simplemente el Sol y los planetas rodeados por las estrellas fijas esparcidas por la «bóveda celeste». Hoy en día sabemos que nuestro Sol es una de las cien mil millones de estrellas de nuestra galaxia, que a su vez es una de al menos cien mil millones de otras galaxias.

Pero a pesar de estos horizontes conceptuales enormemente extendidos (y a pesar de nuestro conocimiento aumentado del mundo natural, y de nuestro control sobre él), la escala temporal en la que podemos planificar de manera razonable, o hacer predicciones seguras, se ha reducido en lugar de ampliarse. La Edad Media en Europa fue una época turbulenta e incierta. Pero esta época se desarrollaba frente a un «telón de fondo» que cambiaba poco de una generación a la siguiente; fielmente, los albañiles medievales añadían ladrillo tras ladrillo a catedrales que tardarían un siglo en terminarse. Pero para nosotros, a diferencia de lo que les ocurría a ellos, el próximo siglo será drásticamente diferente del actual. Ha habido una disyunción explosiva entre las escalas de tiempo del cambio técnico y social, que se reducen cada vez más, y los períodos temporales de la biología, la geología y la cosmología, con duraciones del orden de miles de millones de años.

Los humanos son ahora tan numerosos y tienen una «huella» colectiva tan pesada que tienen la capacidad de transformar, o incluso de devastar, toda la biosfera. La población creciente y cada vez más exigente del mundo ejerce presión sobre el ambiente natural: las acciones de las personas podrían desencadenar un cambio climático y extinciones en masa peligrosos si se



rebasan «puntos de inflexión», un resultado que legaría un mundo agotado y empobrecido a las generaciones futuras. Pero para reducir estos riesgos no necesitamos poner freno a la tecnología; por el contrario, necesitamos aumentar nuestro conocimiento de la naturaleza y hacer uso con más urgencia de una tecnología apropiada. Estos son los temas del capítulo 1 de este libro.

La mayoría de las personas del mundo viven una vida mejor que la que tuvieron sus padres, y la proporción de los que viven en una pobreza abyecta se ha ido reduciendo. Estas mejoras, sobre un trasfondo de una población que crecía rápidamente, no podrían haberse dado sin avances en la ciencia y la tecnología, que han sido fuerzas positivas en el mundo. En el capítulo 2, argumento que nuestra vida, nuestra salud y nuestro ambiente pueden beneficiarse todavía más de ulteriores avances en biotecnología, cibertecnología, robótica e inteligencia artificial. En este sentido, soy un tecnooptimista. Pero hay un aspecto negativo potencial. Estos avances exponen a nuestro mundo cada vez más interconectado a nuevas vulnerabilidades. Incluso en la década o las dos décadas próximas, la tecnología alterará pautas laborales, economías nacionales y relaciones internacionales. En una época en la que todos estamos interconectados, cuando los desfavorecidos son conscientes de sus apuros y cuando la migración es fácil, cuesta ser optimista acerca de un mundo pacífico si persiste un abismo, tan profundo como lo es en la geopolítica de hoy día, entre los niveles de bienestar y las oportunidades de la vida en regiones diferentes. Es especialmente inquietante si los avances en genética y medicina que pueden mejorar la vida humana solo están al alcance de unos pocos privilegiados y presagian formas de desigualdad más fundamentales.

Algunos fomentan una visión de color de rosa del futuro, y se entusiasman acerca de las mejoras en nuestras sensibilidades morales así como en nuestro progreso material. No comparto esta perspectiva. Es evidente que gracias a la tecnología ha habido una bienvenida mejora en la mayor parte de la vida de la gente y en sus probabilidades de vivir: en educación, salud y duración de la vida. Sin embargo, la brecha entre cómo es el mundo y cómo podría ser es más amplia de lo que nunca fue. Quizá la vida de la gente en la Edad Media era miserable, pero se podría haber hecho muy poco para mejorarla. En cambio, los apuros de las personas que forman parte de los mil millones situados en último lugar en el mundo de hoy se podrían transformar redistribuyendo las riquezas de las mil personas más ricas del planeta. El fracaso en dar respuesta a este imperativo humanitario, que las

naciones tienen el poder de remediar, sin duda plantea dudas sobre cualquier declaración de progreso moral institucional.

Los potenciales de la biotecnología y del ciber mundo son excitantes... pero también son aterradores. En la actualidad ya estamos, individual y colectivamente, dotados de tanto poder por la innovación acelerada que podemos (a propósito, o como consecuencias involuntarias) engendrar cambios globales que reverberarán durante siglos. El teléfono inteligente, la web mundial y sus complementos ya son fundamentales para nuestra vida interconectada. Pero estas tecnologías habrían parecido mágicas hace solo veinte años. De modo que, al considerar cómo será el futuro dentro de algunas décadas, hemos de mantener nuestra mente abierta, o al menos entreabierta, a avances transformadores que hoy pueden parecer ciencia ficción.

No podemos prever con seguridad estilos de vida, actitudes, estructuras sociales o tamaños de población ni siquiera a pocas décadas de la actualidad, y mucho menos el contexto geopolítico en el que estas tendencias se desarrollarán. Además, hemos de estar al tanto de un tipo de cambio sin precedentes que puede surgir en cuestión de pocas décadas. Los propios seres humanos (su mentalidad y su físico) pueden hacerse maleables mediante el despliegue de modificación genética y tecnologías cibernéticas. Esto es un cambio de las reglas del juego. Cuando admiramos la literatura y los artefactos que han sobrevivido de la Antigüedad sentimos una afinidad, a través de una brecha temporal de miles de años, con aquellos artistas antiguos y sus civilizaciones. Pero podemos tener una confianza nula en que las inteligencias dominantes dentro de algunos siglos tengan alguna resonancia emocional con nosotros... aunque puedan tener una comprensión algorítmica de cómo nos comportábamos.

El siglo XXI es especial por otra razón: es el primero en el que los humanos pueden desarrollar hábitats más allá de la Tierra. Los «colonos» pioneros en un mundo extraño tendrán que adaptarse a un ambiente hostil, y se hallarán fuera del alcance de reguladores terrestres. Estos aventureros podrían encabezar la transición de la inteligencia orgánica a la electrónica. Esta nueva encarnación de la «vida», al no requerir una superficie planetaria o una atmósfera, podría extenderse mucho más allá de nuestro sistema solar. El viaje interestelar no es intimidante para entidades electrónicas casi inmortales. Si la vida es ahora única de la Tierra, esta diáspora sería un acontecimiento de importancia cósmica. Pero si la inteligencia ya impregna el cosmos, nuestra prole se unirá a ella. Esto podría producirse a escalas de tiempo astronómicas, no de «meros» siglos. El capítulo 3 presenta una perspectiva

sobre estos escenarios a largo plazo: si los robots sustituirán a la inteligencia «orgánica», y si dicha inteligencia ya existe en otra parte del cosmos.

Lo que le ocurra a nuestra progenie, aquí en la Tierra, y quizá mucho más allá, dependerá de tecnologías que apenas podemos concebir hoy en día. En siglos futuros (todavía un instante en la perspectiva cósmica), nuestra inteligencia creativa podría acelerar las transiciones desde una especie basada en la Tierra a otra que viajará por el espacio, y desde la inteligencia biológica a la electrónica, transiciones que podrían inaugurar miles de millones de años de evolución poshumana. Por otra parte, tal como se comenta en los capítulos 1 y 2, los humanos podrían desencadenar catástrofes bio, ciber o ambientales que impidieran todas estas potencialidades.

El capítulo 4 ofrece algunas incursiones (quizá autocomplacientes) en temas científicos, fundamentales y filosóficos, que plantean cuestiones acerca del alcance de la realidad física, y de si existen límites intrínsecos a cuánto comprenderemos jamás de las complejidades del mundo real. Necesitamos evaluar lo que es creíble, y lo que puede descartarse como ciencia ficción, con el fin de prever el impacto de la ciencia en las perspectivas a largo plazo de la humanidad.

En el capítulo final abordo cuestiones más próximas al aquí y ahora. La ciencia, aplicada de modo óptimo, podría ofrecer un futuro brillante para los nueve o diez mil millones de personas que habitarán la Tierra en 2050. Pero ¿cómo podemos maximizar las probabilidades de alcanzar este futuro benigno al tiempo que evitamos los aspectos negativos y distópicos? Nuestra civilización está moldeada por innovaciones que surgen de avances científicos y el consiguiente conocimiento de la naturaleza cada vez más profundo. Será necesario que los científicos hablen con el público más amplio y usen su experiencia de manera beneficiosa, en especial cuando lo que está en juego es tanto y tan importante. Finalmente, me ocupo de los retos globales de hoy en día, y hago énfasis en que estos pueden requerir nuevas instituciones internacionales, informadas y facultadas por ciencia bien dirigida, pero también que responda a la opinión pública sobre política y ética.

Nuestro planeta, este «punto azul pálido» en el cosmos, es un lugar especial. Puede que sea un lugar único. Y somos sus administradores en una época especialmente crucial. Este es un mensaje importante para todos nosotros... y el tema de este libro.

# 1

## DE LLENO EN EL ANTROPOCENO

### PELIGROS Y PERSPECTIVAS

Hace años, conocí a un famoso magnate de la India. Sabiendo que yo tenía el título inglés de «astrónomo real», me preguntó: «¿Elabora usted los horóscopos de la reina?». Le contesté, con cara seria: «Si ella quisiera uno, yo soy la persona a la que se lo pediría». Parecía ansioso de escuchar mis predicciones. Le dije que la bolsa fluctuaría, que habría tensiones en Oriente Próximo, y cosas por el estilo. Prestó una atención impaciente a estas «ideas». Pero entonces me sinceré. Le dije que solo era un astrónomo, no un astrólogo. De repente perdió todo interés en mis predicciones. Y con razón: los científicos son pronosticadores horribles... casi tan malos como los economistas. Por ejemplo, en la década de 1950, un astrónomo real anterior dijo que los viajes espaciales eran «una absoluta tontería».

Los políticos y los abogados tampoco tienen una respuesta sólida. Un futurólogo sorprendente fue F. E. Smith, conde de Birkenhead, amigo de Churchill y lord canciller del Reino Unido en la década de 1920. En 1930 escribió un libro titulado *The World in 2030*<sup>[2]</sup>. Había leído a los futurólogos de su época; imaginaba que se incubaría a los bebés en matraces, coches que volarían y fantasías de este tipo. En cambio, predecía un anquilosamiento social. He aquí una cita: «En 2030 las mujeres inspirarán todavía, por su buen juicio y sus encantos, a los hombres más capaces para que estos alcancen cotas elevadas que nunca habrían conseguido alcanzar por sí mismos».

¡Con esto basta!

En 2003 escribí un libro que titulé *Our Final Century?* Mi editor en el Reino Unido eliminó el interrogante. Los editores americanos cambiaron el título a *Our Final Hour*<sup>[3]</sup>. Mi tema era el siguiente: nuestra Tierra tiene cuarenta y cinco millones de siglos de antigüedad. Pero este siglo es el primero en el que una especie (la nuestra) puede determinar el destino de la biosfera. Yo no creía que nos eliminaríamos. Pero sí que seríamos afortunados si evitábamos

colapsos devastadores. Esto se debe a tensiones insostenibles sobre los ecosistemas: somos muchos (la población mundial va aumentando) y exigimos cada vez más recursos. Y, lo que todavía es más preocupante, la tecnología nos confiere cada vez más poder, con lo que nos expone a nuevas vulnerabilidades.

Me inspiró, entre otros, un gran sabio de principios del siglo xx. En 1902, el joven H. G. Wells dictó una célebre conferencia en la Institución Real de Londres<sup>[4]</sup>. Afirmaba que:

La humanidad ha hecho algo de camino, y la distancia que hemos recorrido nos da cierta percepción del camino que hemos de emprender [...] Es posible creer que todo el pasado no es más que el principio de un principio, y que todo lo que es y ha sido no es más que el crepúsculo del alba. Es posible creer que todo lo que la mente humana ha logrado no es más que el sueño antes del despertar; de nuestro linaje surgirán mentes que llegarán hasta nosotros en nuestra pequeñez para conocernos mejor de lo que nosotros nos conocemos. Llegará un día, un día de la sucesión interminable de días, en el que seres, seres que ahora están latentes en nuestros pensamientos y ocultos en nuestras entrañas, se pondrán de pie sobre esta Tierra como nosotros nos podemos poner de pie sobre un taburete y se reirán y extenderán sus manos entre las estrellas.

La prosa más bien florida de Wells todavía resuena más de cien años después; se dio cuenta de que los humanos no somos la culminación de la vida emergente.

Pero Wells no era un optimista. También subrayó el riesgo del desastre global:

Es imposible demostrar por qué determinadas cosas no podrían destruirnos absolutamente y acabar con la historia humana [...] y hacer vanos todos nuestros esfuerzos [...] algo procedente del espacio, o la peste, o alguna gran enfermedad de la atmósfera, algún veneno soltado por la cola de un cometa, alguna gran emanación de vapor del interior de la Tierra, o nuevos animales que nos depreden, o alguna droga o locura ruinosa en la mente del hombre.

Cito a Wells porque refleja la mezcla de optimismo e inquietud (y de especulación y ciencia) que intentaré comunicar en este libro. Si Wells

escribiera en la actualidad se entusiasmaría por nuestra visión ampliada de la vida y el cosmos, pero se sentiría incluso más inquieto ante los peligros a los que nos enfrentamos. Ciertamente, los riesgos son cada vez mayores; la nueva ciencia ofrece enormes oportunidades, pero sus consecuencias podrían poner en peligro nuestra supervivencia. Son muchos los que están preocupados porque avanza tan deprisa que ni los políticos ni el público profano pueden asimilarla o estar al día.

El lector podría pensar que, puesto que soy un astrónomo, la inquietud acerca de las colisiones de asteroides me mantiene despierto por la noche. En absoluto. De hecho, esta es una de las pocas amenazas que podemos cuantificar... y estar seguros de que es improbable. Cada diez millones de años, aproximadamente, un cuerpo de unos pocos kilómetros de diámetro chocará con la Tierra y causará una catástrofe global; de modo que hay unas pocas probabilidades entre un millón de que tal impacto tenga lugar durante la vida de un ser humano. Existe un número mayor de asteroides más pequeños que podrían causar una devastación regional o local. El evento de Tunguska, en 1908, que arrasó cientos de kilómetros cuadrados de bosque (afortunadamente despoblados) de Siberia, liberó energía equivalente a varios cientos de bombas atómicas de Hiroshima.

¿Podemos estar prevenidos de estos aterrizajes de emergencia? La respuesta es que sí. Hay en marcha planes para crear una base de datos del millón de asteroides mayores de 50 metros que potencialmente podrían cruzarse con la Tierra, y para seguir sus órbitas de manera lo bastante precisa para identificar aquellos que podrían acercarse peligrosamente. Con el aviso de un impacto, las áreas más vulnerables podrían evacuarse. Una noticia todavía mejor es que sería factible que desarrolláramos naves espaciales que podrían protegernos. Un «empujoncito», dado en el espacio varios años antes del impacto amenazador, solo tendría que cambiar la velocidad de un asteroide unos pocos centímetros por segundo para desviarlo de un rumbo de colisión con la Tierra.

Si calculamos una prima de seguros de la manera usual, multiplicando la probabilidad por las consecuencias, resulta que vale la pena gastar unos cuantos cientos de millones de dólares anuales para reducir el riesgo de asteroides.

Otras amenazas naturales (terremotos y volcanes) son menos predecibles. Hasta el presente no hay manera creíble de prevenirlos (o incluso

de predecirlos de manera fiable). Pero hay una cosa tranquilizadora sobre estos acontecimientos, como la hay con respecto a los asteroides: su ritmo no está aumentando. Es aproximadamente el mismo para nosotros que el que había para los neandertales... o de hecho para los dinosaurios. Pero las consecuencias de dichos acontecimientos dependen de la vulnerabilidad y del valor de la infraestructura que está en riesgo, que es mucho mayor en el mundo urbanizado de hoy en día. Además, existen fenómenos cósmicos de los que los neandertales (y, de hecho, todos los humanos anteriores al siglo XIX) no se habrían dado cuenta: llamaradas gigantes del Sol. Estas desencadenan tormentas magnéticas que pueden alterar las redes eléctricas y las comunicaciones electrónicas en todo el mundo.

A pesar de estas amenazas naturales, los peligros que deberían preocuparnos más son los que engendran los propios humanos. Ahora estos se ciernen mucho más graves, se están haciendo más probables y potencialmente más catastróficos con cada década que pasa.

Ya hemos tenido la suerte de librarnos una vez de ellos.

## **AMENAZAS NUCLEARES**

En la época de la guerra fría, cuando los niveles armamentísticos aumentaron más allá de toda razón, las superpotencias podrían haber dado un mal paso hacia el Armagedón debido a la confusión y a cálculos erróneos. Era la era de los «refugios nucleares». Durante la crisis de los misiles cubanos, mis compañeros estudiantes y yo participamos en vigilias y manifestaciones, nuestro estado de ánimo aliviado solo por «canciones de protesta», como la que tenía esta letra de Tom Lehrer: «Iremos todos juntos cuando vayamos, todos bañados por un resplandor incandescente»<sup>[5]</sup>. Pero nos habríamos espantado mucho más si nos hubiéramos dado realmente cuenta de lo cerca que estuvimos de la catástrofe. Se comentó que el presidente Kennedy había dicho que las probabilidades eran «entre una de cada tres e igualadas». Y, hasta mucho tiempo después de haberse retirado, Robert McNamara no declaró sinceramente que «estuvimos a un paso de la guerra nuclear sin darnos cuenta de ello. No es mérito nuestro que nos libráramos; Jrushchov y Kennedy tuvieron suerte y también fueron sensatos».

Ahora conocemos más detalles de uno de los momentos más tensos. Vasili Arjipov, un oficial muy respetado y condecorado de la armada rusa, servía como número dos en un submarino que llevaba misiles nucleares.

Cuando los Estados Unidos atacaron al submarino con cargas de profundidad, el capitán dedujo que había estallado la guerra y quería que la tripulación lanzara los misiles. El protocolo requería que los tres oficiales de máxima graduación a bordo estuvieran de acuerdo. Arjipov estuvo en contra de dicha acción, y por ello evitó desencadenar un intercambio nuclear que podría haberse intensificado de forma catastrófica.

Las evaluaciones realizadas después de la crisis de Cuba sugieren que el riesgo anual de destrucción termonuclear durante la guerra fría fue unas diez mil veces mayor que la tasa media de muerte debida al impacto de un asteroide. Y, de hecho, hubo otros «casi errores» en los que la catástrofe se evitó solo por un pelo. En 1983, Stanislav Petrov, un oficial de la Fuerza Aérea Rusa, estaba controlando una pantalla cuando una «alerta» indicó que cinco misiles balísticos intercontinentales Minuteman se habían lanzado desde los Estados Unidos hacia la Unión Soviética. Las instrucciones de Petrov, cuando ocurrió esto, eran alertar a su superior (quien podía, en cuestión de minutos, desencadenar la represalia nuclear). Petrov decidió, sobre la base únicamente de una corazonada, no hacer caso de lo que había visto en la pantalla, suponiendo que era un fallo en el sistema de alerta temprana. Y esto es lo que era; el sistema había confundido la reflexión de los rayos del sol sobre la parte superior de unas nubes con un lanzamiento de misiles.

Son muchos los que ahora afirman que la disuasión nuclear funcionó. En cierto sentido, lo hizo. Pero esto no significa que fuera una política sensata. Si jugamos a la ruleta rusa con una o dos balas en el cilindro, tenemos más probabilidades de sobrevivir que de no hacerlo, pero lo que esté en juego tendría que ser asombrosamente importante (o el valor que demos a nuestra vida excesivamente nimio) para que esta sea una apuesta sensata. Nos vimos arrastrados a una apuesta de este tipo a lo largo de toda la época de la guerra fría. Sería interesante saber a qué nivel de riesgo pensaban otros líderes que nos exponían, y qué probabilidades habrían aceptado la mayoría de los ciudadanos europeos, si se les hubiera pedido que dieran su consentimiento informado. Por mi parte, yo no hubiera escogido arriesgarme a una probabilidad entre tres (y ni siquiera a una entre seis) de una catástrofe que habría matado a cientos de millones y destrozado el tejido histórico de todas las ciudades europeas, aunque la alternativa hubiera sido determinado dominio soviético de Europa occidental. Y, desde luego, las consecuencias devastadoras de la guerra termonuclear se habrían extendido mucho más allá



de los países que se enfrentaban a una amenaza directa, en especial si se desencadenaba un «invierno nuclear».

La aniquilación nuclear todavía se cierne sobre nosotros; el único consuelo es que, gracias a los esfuerzos del control de armas entre las superpotencias, ahora hay unas cinco veces menos armas nucleares que durante la guerra fría (Rusia y los Estados Unidos tienen unas siete mil cada uno), y hay menos en una alerta de «gatillo sensible». Sin embargo, ahora hay nueve potencias nucleares, y una mayor probabilidad que nunca antes de que arsenales nucleares más pequeños puedan usarse regionalmente, o incluso por terroristas. Además, no podemos descartar que más avanzado el siglo se produzca una realineación geopolítica que conduzca a un punto muerto entre nuevas superpotencias. Una nueva generación podría enfrentarse a su propia «Cuba», una crisis que podría manejarse menos bien (o con menos suerte) que la de 1962. Una amenaza nuclear casi existencial se halla simplemente en suspenso.

El capítulo 2 tratará de las ciencias del siglo XXI (bio, ciber e inteligencia artificial –IA–) y lo que podrían presagiar. Su mal uso se cierne como un riesgo creciente. Las técnicas y la experiencia para bio o ciberataques serán accesibles a millones de personas: no requieren grandes instalaciones especiales como ocurre con las armas nucleares. Casos de ciber sabotaje como el de «Stuxnet» (que destruyó las centrífugas empleadas en el programa iraní de armas nucleares), y el pirateo informático frecuente de instituciones financieras, ya han hecho que estos asuntos figuren en la agenda política. Un informe del Consejo Científico del Pentágono afirmaba que el impacto de un ciberataque (que inutilizara, por ejemplo, la red eléctrica de los Estados Unidos) sería lo bastante catastrófico para justificar una respuesta nuclear<sup>[6]</sup>.

Pero, antes de esto, centrémonos en la devastación potencial que podría causar la degradación ambiental causada por los humanos, y el cambio climático. Estas amenazas interconectadas son a largo plazo e insidiosas. Surgen de la «huella ecológica» colectiva de la humanidad, cada vez más pesada. A menos que las generaciones futuras pisen más suavemente (o a menos que se reduzcan los niveles de población), la ecología de nuestro planeta finito se verá tensionada más allá de los límites sostenibles.

## **AMENAZAS ECOLÓGICAS Y PUNTOS DE INFLEXIÓN**

Hace cincuenta años, la población mundial era de unos 3500 millones de personas. Ahora se estima que es de 7600 millones. Pero el aumento se está haciendo más lento. En realidad, el número de nacimientos anuales, en todo el mundo, alcanzó un máximo hace pocos años y ahora se está reduciendo. No obstante, se prevé que la población mundial alcance los nueve mil millones, o incluso más, hacia el año 2050<sup>[7]</sup>. Esto se debe a que la mayoría de los habitantes en el mundo en desarrollo son todavía jóvenes y no han tenido hijos, y porque vivirán más años; el histograma de edades para el mundo en desarrollo acabará pareciéndose más al de Europa. En la actualidad, el mayor crecimiento se produce en Asia oriental, que es donde se concentrarán los recursos humanos y financieros del mundo, lo que pondrá fin a cuatro siglos de hegemonía del Atlántico norte.

Los demógrafos predicen una urbanización continuada, con un 70 % de la población que vivirá en ciudades en 2050. Ya en 2030, Lagos, São Paulo y Nueva Delhi tendrán poblaciones que pasarán de treinta millones. Impedir que las megaciudades se conviertan en distopías turbulentas será un reto principal para la gobernabilidad.

Hoy en día no se discute apenas el crecimiento demográfico. Esto puede ser en parte debido a que las predicciones tremendamente alarmistas de hambrunas generalizadas (por ejemplo, en el libro de Paul Ehrlich *The Population Bomb*<sup>[8]</sup>, de 1968, y en las declaraciones del Club de Roma) han resultado equivocadas. Asimismo, algunos creen que el crecimiento demográfico es un tema tabú, contaminado por la asociación con la eugenesia en las décadas de 1920 y 1930, con las políticas de la India bajo Indira Gandhi y más recientemente con la política de línea dura de la China de solo un hijo. Resulta que la producción de alimentos y la extracción de recursos han ido a la par con el aumento de la población; todavía se producen hambrunas, pero se deben a conflictos o a mala distribución, no a una escasez generalizada<sup>[9]</sup>.

No podemos especificar una «población óptima» para el mundo porque no podemos concebir con seguridad cuáles serán los estilos de vida de la gente, su dieta, sus pautas de viaje y sus necesidades energéticas más allá de 2050. El mundo no podría soportar ni siquiera su población actual si todos sus habitantes vivieran de forma tan despilfarradora (todos gastando tanta energía y comiendo tanto vacuno) como los norteamericanos ricos lo hacen en la actualidad. En cambio, veinte mil millones podrían vivir de manera sostenible, con una calidad de vida tolerable (aunque ascética), si todos adoptaran una dieta vegana, viajaran poco, vivieran en pequeños

apartamentos de densidad elevada e interactuaran a través de superinternet y de realidad virtual. Esta última situación hipotética es muy improbable, y ciertamente no es nada atractiva. Pero la distancia entre estos extremos subraya lo ingenuo que es citar sin reservas en titulares una cifra para la «capacidad de carga» del mundo.

Un mundo con nueve mil millones de personas, número al que podría llegarse (o incluso superarse un poco) en 2050, no tiene por qué suponer una catástrofe. La agricultura moderna (cultivos con labrado superficial, con conservación de agua y quizá de plantas genéticamente modificadas —GM—, junto con una mejor ingeniería para reducir los residuos, mejora de la irrigación, etc.) podría alimentar dicha cantidad de forma plausible. La frase en boga es «intensificación sostenible». Pero habrá limitaciones energéticas, y en algunas regiones una fuerte presión sobre los recursos hídricos. Las cifras que siguen son notables. Para producir un kilogramo de trigo se necesitan 1500 litros de agua y varios megajoules de energía. Pero un kilogramo de carne de res necesita diez veces más agua y veinte veces más energía. La producción de alimento gasta el 30 % de la producción mundial de energía y el 70 % de la extracción de agua.

Las técnicas agrícolas que usan organismos GM pueden ser beneficiosas. Para tomar un ejemplo específico, la Organización Mundial de la Salud (OMS) estima que el 40 % de los niños de menos de cinco años en el mundo en desarrollo padecen deficiencia de vitamina A; esta es la principal causa de la ceguera infantil a escala global, que afecta a cientos de miles de niños cada año. El llamado arroz dorado, desarrollado por vez primera en la década de 1990 y mejorado posteriormente, libera beta-caroteno, el precursor de la vitamina A, y mitiga la deficiencia de vitamina A. Lamentablemente, las organizaciones que hacen campaña, Greenpeace en particular, han obstaculizado el cultivo del arroz dorado. Desde luego, es preocupante «manipular la naturaleza», pero, en este caso, unas técnicas nuevas podrían haber mejorado la «intensificación sostenible». Además, hay esperanzas de que una modificación más drástica del genoma del arroz (la llamada ruta C4) podría mejorar la eficiencia de la fotosíntesis, lo que permitiría un crecimiento más rápido y más intensivo del primero de los alimentos esenciales del mundo.

Dos innovaciones potenciales de la dieta no se enfrentan a una gran barrera técnica: convertir a insectos (muy nutritivos y ricos en proteína) en comida apetitosa, y producir carne artificial a partir de proteína vegetal. Por lo que se refiere a esto último, una compañía de California llamada Impossible

Foods ha estado vendiendo hamburguesas de «vacuno» (hechas principalmente de trigo, coco y patata) desde 2015. Sin embargo, todavía se tardará un poco para que estas hamburguesas satisfagan a los sibaritas para los que el jugo de remolacha es un pobre sustituto de la sangre. Pero los bioquímicos están en ello, explorando técnicas más refinadas. En principio, es posible hacer «crecer» carne tomando unas pocas células de un animal y después estimulando su crecimiento con los nutrientes apropiados. Otro método, denominado agricultura acelular, usa organismos genéticamente modificados (bacterias, levaduras, hongos o algas) para producir las proteínas y grasas que se encuentran, por ejemplo, en la leche y los huevos. Existe un claro incentivo financiero, así como un imperativo ecológico para desarrollar sustitutos aceptables de la carne, de modo que podemos ser optimistas acerca de su progreso rápido.

Podemos ser optimistas tecnológicos en lo que respecta a los alimentos... y asimismo a la salud y la educación. Pero es difícil no ser un pesimista político. Mejorar las probabilidades de supervivencia de la gente más pobre del mundo al proporcionarles la alimentación adecuada, la educación primaria y otros medios básicos es un objetivo que se puede conseguir fácilmente; los impedimentos son principalmente políticos.

Si hay que extender por todo el mundo los beneficios de la innovación, será necesario que en todos nosotros haya cambios en el estilo de vida. Pero dichos cambios no tienen por qué suponer privaciones. En realidad, en el año 2050 todos pueden tener una calidad de vida que sea al menos tan buena como la que hoy en día gozan los derrochadores de Occidente... siempre que la tecnología se desarrolle de forma apropiada y se haga uso de ella de manera sensata. Gandhi proclamó este mantra: «Hay suficiente para las necesidades de todos, pero no para la codicia de todos». Esto no tiene por qué ser una llamada a la austeridad; más bien, requiere un crecimiento económico impulsado por innovaciones que sean parcas en recursos naturales y energía.

La frase «desarrollo sostenible» obtuvo popularidad en 1987, cuando la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, que presidía Gro Harlem Brundtland, la primera ministra de Noruega, lo definió como «el desarrollo que satisface las necesidades del presente, especialmente de los pobres, sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer sus propias necesidades»<sup>[10]</sup>. Es seguro que todos querríamos «suscribir» este objetivo con la esperanza de que en 2050 habrá una brecha más reducida entre el estilo de vida de que gozan las sociedades privilegiadas y la que está disponible para el resto del mundo. Esto no puede suceder si los

países en desarrollo imitan el camino que siguieron Europa y Norteamérica. Estos países necesitan dar el salto directamente a un modo de vida más eficiente y menos derrochador. El objetivo no es la antitecnología. Se necesitará más energía, pero dirigida apropiadamente, de manera que constituya la base de la innovación necesaria. Las naciones más desarrolladas también tienen que efectuar esta transición.

La tecnología de la información (TI) y los medios de comunicación social son en la actualidad omnipresentes en una escala global. Los agricultores rurales en África pueden acceder a información sobre el mercado que evita que los intermediarios los estafen, y pueden transferir dinero electrónicamente. Pero estas mismas tecnologías significan que los que viven en partes desfavorecidas del mundo se den cuenta de lo que se están perdiendo. Este conocimiento desencadenará un mayor resentimiento, que motivará la migración en masa o el conflicto, si se percibe que estos contrastes son excesivos e injustos. No se trata solo de un imperativo moral, sino también de una cuestión de egoísmo, para que las naciones afortunadas promuevan una mayor igualdad, tanto mediante ayuda financiera directa (y cesando la actual extracción explotadora de materias primas) como a través de la inversión en infraestructuras y en fábricas en países en los que hay refugiados desplazados, de modo que los desahuciados tengan menos presión para migrar y encontrar trabajo.

Pero los objetivos a largo plazo tienden a caer de la agenda política, superados por los problemas inmediatos... y por la mirada puesta en las próximas elecciones. El presidente de la Comisión Europea, Jean-Claude Juncker, dijo: «Todos sabemos qué hay que hacer; simplemente, no sabemos cómo ser reelegidos una vez lo hayamos hecho»<sup>[11]</sup>. Se refería a las crisis financieras, pero su observación es incluso más apropiada para los retos ambientales (y ahora está sucediendo con la puesta en marcha desalentadoramente lenta de los Objetivos del Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas).

Existe una brecha deprimente entre lo que podría hacerse y lo que sucede realmente. Ofrecer más ayuda no es suficiente por sí mismo. Se necesitan estabilidad, buen gobierno e infraestructuras efectivas si estos beneficios han de extenderse por el mundo en desarrollo. El magnate sudanés Mo Ibrahim, cuya compañía encabezó la introducción de teléfonos móviles en África, estableció en 2007 un premio de 5 millones de dólares repartidos durante los diez primeros años, más 200 000 dólares anuales a partir de entonces, para reconocer a líderes ejemplares y no corruptos de países

africanos; el premio Ibrahim por Logros en el Liderazgo Africano se ha concedido cinco veces.

Las acciones relevantes no son necesariamente las que se producen en el nivel de la nación-estado. Desde luego, algunas requieren cooperación multinacional, pero muchas reformas efectivas necesitan una puesta en práctica más local. Existen enormes oportunidades para que las ciudades de mente abierta se dediquen a explorar y a encabezar las innovaciones de alta tecnología que serán necesarias en las megaciudades del mundo en desarrollo en las que los retos son especialmente abrumadores.

El cortoplacismo no es solo una característica de las políticas electorales. Los inversores privados tampoco tienen un horizonte lo suficientemente lejano. Las inmobiliarias no construirán un nuevo edificio de oficinas a menos que tengan un rendimiento en (pongamos por caso) treinta años. De hecho, la mayoría de los rascacielos en ciudades tienen una «vida prevista» de solo cincuenta años (un consuelo para los que deploramos su dominio en la línea del horizonte urbano). Los beneficios e inconvenientes potenciales más allá de este período ya no se tienen en cuenta.

¿Y qué hay del futuro más distante? Las tendencias demográficas más allá de 2050 son difíciles de predecir. Dependerán de lo que los jóvenes de hoy, y de los que todavía no han nacido, decidan acerca del número de sus hijos y de la separación entre nacimientos. La mejora en la educación y el empoderamiento de las mujeres (que a buen seguro es una prioridad por sí misma) pueden reducir las tasas de fertilidad allí donde ahora son más elevadas. Pero esta transición demográfica no ha llegado todavía a partes de la India y del África subsahariana.

El número medio de alumbramientos por mujer en algunas partes de África (Níger, o la Etiopía rural, por ejemplo) es todavía de más de siete. Aunque es probable que la fertilidad se reduzca, es posible, según las Naciones Unidas, que la población de África pueda volver a doblarse hasta cuatro mil millones entre 2050 y 2100, lo que haría que la población global se elevara hasta diez mil millones. Solo Nigeria tendría entonces una población tan grande como Europa y Norteamérica sumadas, y casi la mitad de todos los niños del mundo estarían en África.

Los optimistas nos recuerdan que cada boca extra aporta también dos manos y un cerebro. No obstante, cuanto mayor se haga la población, mayores serán las presiones sobre los recursos, especialmente si el mundo en desarrollo reduce su brecha con el mundo desarrollado en su consumo per cápita. Y más difícil será para África salir de la «trampa de la pobreza». De

hecho, algunos han indicado que las preferencias culturales africanas pueden conducir a una persistencia de familias grandes aun cuando la mortalidad infantil sea baja. Si esto ocurre, la libertad para elegir el tamaño de nuestra familia, proclamado como uno de los derechos fundamentales de la ONU, puede ponerse en cuestión cuando las externalidades negativas de una población mundial en aumento se coloquen asimismo en la balanza.

Debemos esperar que la población mundial se reduzca en lugar de aumentar a partir de 2050. Aunque pueda darse de comer a nueve mil millones de personas (con buen gobierno y una industria agropecuaria eficiente), e incluso si los artículos para el consumidor se producen de forma más barata (por ejemplo, mediante impresoras 3D) y la «energía limpia» es abundante, la elección de alimentos y la calidad de vida se reducirán debido al hacinamiento y a la disminución de los espacios verdes.

## **MANTENERSE DENTRO DE LOS LÍMITES PLANETARIOS**

Nos encontramos de lleno en el Antropoceno. Este término lo popularizó Paul Crutzen, uno de los científicos que determinaron que el ozono de la alta atmósfera se estaba reduciendo debido a los clorofluorocarbonos (CFC), sustancias químicas que entonces se utilizaban en botes de aerosoles y en frigoríficos. El Protocolo de Montreal de 1987 supuso la prohibición de estas sustancias. Este acuerdo parecía un precedente alentador, pero funcionó porque había sustitutos de los CFC que podían utilizarse sin grandes costes económicos. Lamentablemente, no es tan fácil enfrentarse con los otros cambios globales, más importantes, consecuencia de una población creciente, cambios que exigen más alimentos, energía y otros recursos. Todos estos temas se debaten ampliamente. Lo que es deprimente es la inacción, porque para los políticos lo inmediato vence a lo que es a largo plazo; lo provinciano vence a lo mundial. Necesitamos preguntar si las naciones han de ceder más soberanía a nuevas organizaciones en la línea de las organizaciones que ya existen bajo los auspicios de las Naciones Unidas.

Las presiones de una población en aumento y del cambio climático causarán la pérdida de biodiversidad, un efecto que se agravará si los terrenos adicionales necesarios para la producción de alimento o de biocombustibles se detraen de los bosques naturales. Los cambios en el clima y las alteraciones en el uso del suelo pueden, en combinación, inducir «puntos de inflexión» que se amplifiquen mutuamente y que provoquen cambios fuera de control y

potencialmente irreversibles. Si el impacto colectivo de la humanidad sobre la naturaleza presiona con demasiada fuerza sobre lo que Johan Rockström, un ambientalista de Estocolmo, denomina «fronteras planetarias»<sup>[12]</sup>, el «impacto ecológico» resultante podría empobrecer nuestra biosfera de manera irreversible.

¿Por qué es tan importante esto? Resultaremos muy perjudicados si las poblaciones de peces se reducen hasta la extinción. Existen plantas en la pluviselva que pueden ser útiles con fines medicinales. Pero también hay un valor espiritual, además de los beneficios prácticos de una biosfera diversa. En palabras del eminente ecólogo E. O. Wilson:

En el núcleo de la visión del mundo de los ambientalistas está la convicción de que la salud física y espiritual humana depende del planeta Tierra. [...] Los ecosistemas naturales (bosques, arrecifes de coral, aguas marinas azules) mantienen el mundo tal como quisiéramos que se mantuviera. Nuestro cuerpo y nuestra mente evolucionaron para vivir en este ambiente planetario concreto, y en ningún otro<sup>[13]</sup>.

Las tasas de extinción están aumentando; estamos destruyendo el libro de la vida antes de haberlo leído. Por ejemplo, las poblaciones de los mamíferos «carismáticos» han caído, en algunos casos hasta niveles que amenazan a las especies. Muchas de las seis mil especies de ranas, sapos y salamandras son especialmente sensibles. Y, para citar de nuevo a E. O. Wilson, «si las acciones humanas conducen a extinciones en masa, es el pecado que menos nos perdonarán las generaciones futuras».

Incidentalmente, aquí las grandes creencias religiosas pueden ser nuestras aliadas. Pertenezco al consejo de la Academia Pontificia de las Ciencias (una institución ecuménica; sus setenta miembros representan todas las creencias o ninguna). En 2014 Partha Dasgupta, un economista de Cambridge, junto a Ram Ramanathan, un climatólogo del Instituto Scripps, de California, organizaron una conferencia de alto nivel sobre sostenibilidad y clima que tuvo lugar en el Vaticano<sup>[14]</sup>. Esta imprimió un oportuno impulso científico a la encíclica papal *Laudato Si*, de 2015. La Iglesia católica trasciende divisiones políticas; no puede negarse su ámbito mundial, su durabilidad y su visión a largo plazo, o el hecho de que se centre en los pobres del mundo. El papa recibió una fuerte ovación en las Naciones Unidas. Su mensaje resonó especialmente en América Latina, África y Asia oriental.



La encíclica ofrecía asimismo un claro respaldo papal a la idea franciscana de que los humanos tenemos el deber de cuidar de todo lo que los católicos creen que es «la creación de Dios», que el mundo natural tiene valor por derecho propio, totalmente aparte de sus beneficios para los humanos. Esta actitud resuena con los sentimientos que hace más de un siglo expresó magníficamente Alfred Russel Wallace, que fue cocreador<sup>[15]</sup> de la idea de evolución mediante la selección natural:

Pensé en las prolongadas épocas del pasado durante las cuales las sucesivas generaciones de estos seres hermosos recorrieron su camino [...] sin que un ojo inteligente contemplara su encanto, lo que pudiera parecer un derroche gratuito de belleza [...]. Con toda seguridad, esta consideración ha de decirnos que todos los seres vivos no se hicieron para el hombre. [...] Parecería que su felicidad y sus placeres, sus amores y odios, sus luchas por la existencia, su vida vigorosa y su muerte temprana, están relacionados de inmediato únicamente con su propio bienestar y perpetuación<sup>[16]</sup>.

La encíclica papal facilitó el camino para el acuerdo en la Conferencia de París sobre Cambio Climático en diciembre de 2015. Proclamaba de forma elocuente que nuestra responsabilidad (con nuestros hijos, con los pobres, y con nuestra administración de la diversidad de la vida) exige que no dejemos un mundo menguado y peligroso.

Seguramente todos compartimos estos sentimientos. Pero nuestras instituciones seculares, económicas y políticas no planifican lo suficiente a largo plazo. En mis capítulos finales volveré a tratar de los retos abrumadores para la ciencia y el buen gobierno que plantean estas amenazas.

Las normativas pueden ayudar. Pero las normativas no ganarán terreno a menos que cambie la manera de pensar de la sociedad.

En Occidente, determinadas actitudes, por ejemplo, fumar y conducir bebido, se han transformado en las últimas décadas. Necesitamos un cambio de actitud similar para que el consumo manifiestamente excesivo y el derroche de materiales y energía, como los vehículos 4 x 4 (que en Londres son denigrados como «tractores de Chelsea», pues obstruyen las calles en los barrios de clase alta), los calefactores exteriores, las casas muy iluminadas, los complicados envoltorios de plástico, el seguimiento servil de modas que cambian rápidamente, y cosas parecidas, se perciban como «horteras» en lugar de como elegantes. De hecho, una tendencia que suponga alejarse de un consumo excesivo puede tener lugar sin presión exterior. Para mi generación,

nuestro espacio vital (una habitación de estudiante y después algo más espacioso) estaba «personalizado» por libros, CD y fotografías. Ahora que se puede acceder fácilmente en línea a libros y música, quizá nos volvamos menos sentimentales hacia el «hogar». Nos volveremos nómadas, en especial porque en línea es posible hacer más negocios y socializar. El consumismo puede sustituirse por una «economía colaborativa». Si esta situación hipotética se produce, será fundamental que las naciones en desarrollo transiten directamente hacia este estilo de vida, evitando la fase de elevada energía y alto consumo por la que han pasado Europa y los Estados Unidos.

Las campañas efectivas han de asociarse a un logotipo memorable. La serie de la BBC *Planeta azul II*, de 2017, mostraba un albatros que volvía de deambular y de buscar comida a lo largo de miles de millas en los océanos australes, y que regurgitaba a su pollo no los peces nutritivos que este ansiaba, sino pedazos de plástico. Una imagen de este tipo publicita, y motiva, la necesidad de reciclar los plásticos, que de otro modo se acumulan en los océanos (y en las cadenas alimentarias de los animales que allí viven). Asimismo, la imagen antigua e icónica (aunque algo engañosa) que muestra a un oso polar aferrándose a un témpano de hielo que se derrite es emblemática de la crisis del cambio climático, que será mi siguiente tema.

## **EL CAMBIO CLIMÁTICO**

El mundo estará más lleno de gente. Y hay una segunda predicción: gradualmente se volverá más cálido. Las presiones sobre los recursos alimentarios y sobre toda la biosfera se agravarán por los cambios consiguientes en las pautas meteorológicas globales. El cambio climático ejemplifica la tensión entre la ciencia, la sociedad y los políticos. A diferencia de lo que ocurre con las cuestiones demográficas, ciertamente no es un tema que se pase por alto, a pesar del hecho de que en 2017 el régimen de Trump en los Estados Unidos prohibió que términos tales como «calentamiento global» y «cambio climático» aparecieran en documentos públicos. Pero resulta desalentador que no se actúe frente a las implicaciones del cambio climático.

Una cosa no es discutible. La concentración de CO<sub>2</sub> en el aire está aumentando, debido sobre todo a la quema de combustibles fósiles. El científico Charles Keeling midió los niveles de CO<sub>2</sub> utilizando un instrumento en el Observatorio de Mauna Loa, en Hawái, que ha estado funcionando

continuamente desde 1958 (después de la muerte de Keeling en 2005, el programa lo ha continuado su hijo Ralph). Y no es discutible que este aumento conduce a un «efecto invernadero». La radiación solar que llega a la Tierra se emite de nuevo al espacio como radiación infrarroja. Pero de la misma manera que el cristal de un invernadero atrapa la radiación infrarroja (aunque deja pasar la luz del sol), el CO<sub>2</sub> actúa de manera parecida como una manta que atrapa el calor en la atmósfera, las masas continentales y los océanos de la Tierra. Esto se comprendió ya el siglo XIX. Un aumento del CO<sub>2</sub> producirá una tendencia al calentamiento a largo plazo, sobreimpuesta a todos los demás efectos complicados que hacen que el clima fluctúe.

Doblar la concentración de CO<sub>2</sub>, si todos los demás aspectos de la atmósfera permanecieran inalterados, causaría un calentamiento de 1,2 °C de promedio sobre toda la Tierra; este es un cálculo fácil de hacer. Pero lo que es más difícil de comprender son los cambios asociados en el vapor de agua, la nubosidad y la circulación oceánica. No sabemos lo importantes que son estos procesos de retroalimentación. El quinto informe del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC), publicado en 2013, presentaba una gama de pronósticos, de la que, a pesar de las incertidumbres, algunas cosas son evidentes. En particular, si las emisiones anuales de CO<sub>2</sub> continúan aumentando sin control, nos arriesgamos a desencadenar un cambio climático drástico, que conduciría a situaciones devastadoras que se prolongarían durante siglos, entre ellas el inicio de una fusión irreversible del hielo en Groenlandia y la Antártida, lo que acabaría por hacer subir varios metros el nivel del mar. Es importante señalar que la «cifra en titulares» de un aumento de la temperatura mundial es solo un promedio; lo que hace que el efecto sea más perturbador es que el aumento es más rápido en algunas regiones y puede desencadenar cambios drásticos en las pautas meteorológicas regionales.

El debate del clima se ha deteriorado debido a un exceso de confusión entre ciencia, política e intereses comerciales. Aquellos a quienes no les gustan las implicaciones de los pronósticos del IPCC han menospreciado la ciencia en lugar de demandar una ciencia mejor. El debate sería más constructivo si los que se oponen a las políticas actuales reconocieran el imperativo de mejorar y concretar las predicciones no solo globalmente, sino, lo que es más importante, para regiones individuales. Científicos de Cambridge y California<sup>[17]</sup> han puesto en marcha un proyecto denominado Vital Signs, que pretende utilizar cantidades enormes de datos climáticos y ambientales para descubrir qué tendencias locales (sequías, olas de calor, etc.)

están correlacionadas más directamente con el aumento de la temperatura media. Esto podría ofrecer a los políticos algo más relevante y fácil de apreciar que un aumento medio del calentamiento.

La tasa de aumento del CO<sub>2</sub> en la atmósfera dependerá de las tendencias demográficas futuras y de la medida en que el mundo continúe dependiendo de los combustibles fósiles. Pero incluso para una situación hipotética futura de emisión de CO<sub>2</sub>, no podemos predecir lo rápidamente que aumentará la temperatura media, a causa del «factor de sensibilidad climática» debido a una retroalimentación incierta. El consenso de los expertos del IPCC era que, de seguir las cosas como ahora, con una población en aumento y una dependencia continuada de los combustibles fósiles, existe una probabilidad del 5 % de desencadenar un calentamiento de más de seis grados en el próximo siglo. Si pensamos en el gasto actual para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> como una política de seguros, la principal justificación es evitar la reducida probabilidad de algo realmente catastrófico (como sería un aumento de seis grados) en lugar de una probabilidad del 50 % de algo que sería gravemente perjudicial, pero a lo que podríamos adaptarnos.

El objetivo proclamado en la Conferencia de París era evitar que el aumento medio de temperatura superara los dos grados, y si era posible limitarlo a 1,5 grados. Este es un objetivo apropiado si queremos reducir el riesgo de traspasar «puntos de inflexión» peligrosos. Pero la pregunta es: ¿cómo lo ponemos en marcha? La cantidad de CO<sub>2</sub> que se puede liberar sin violar este límite es incierta por un factor de dos, simplemente debido al factor de sensibilidad climática desconocido. Por lo tanto, el objetivo es insatisfactorio, y es evidente que animará a los intereses de los combustibles fósiles a «promover» descubrimientos científicos que predigan una sensibilidad baja.

A pesar de las incertidumbres, tanto en la ciencia como en las proyecciones demográficas y económicas, hay dos mensajes que son importantes:

1. Las alteraciones regionales en las pautas meteorológicas en los próximos veinte a treinta años agravarán las presiones sobre los alimentos y el agua, causarán más «acontecimientos extremos» y provocarán migración.
2. Si seguimos con situaciones en las que haremos «lo mismo de siempre», en las que el mundo continúa dependiendo de combustibles fósiles, no podemos descartar, más avanzado el siglo, un calentamiento

realmente catastrófico, y puntos de inflexión que disparen tendencias a largo plazo como la fusión del casquete de hielo de Groenlandia.

Pero incluso los que aceptan estas dos declaraciones y están de acuerdo en que existe un riesgo significativo de catástrofe climática dentro de un siglo diferirán en la urgencia con la que abogan por la acción en este momento. Su valoración dependerá de las expectativas de crecimiento futuro y del optimismo acerca de las soluciones tecnológicas. Sin embargo, por encima de todo, depende de una cuestión ética: la medida en que hemos de limitar nuestra propia satisfacción para el beneficio de las generaciones futuras.

Bjørn Lomborg consiguió protagonismo (junto con la condición de «coco» entre muchos climatólogos) debido a su libro *The Skeptical Environmentalist*. Lomborg ha reunido a varios economistas en el llamado Copenhagen Consensus («Consenso de Copenhague») para que se pronuncien sobre problemas y políticas globales<sup>[18]</sup>. Estos economistas aplican un tipo de descuento estándar, con lo que ignoran efectivamente lo que pueda ocurrir más allá de 2050. Existe realmente poco riesgo de catástrofe dentro de este horizonte temporal, de modo que no resulta sorprendente que resten importancia a la prioridad de abordar el cambio climático en comparación con otras maneras de ayudar a los pobres del mundo. Pero, tal como aducirían Nicholas Stern<sup>[19]</sup> y Martin L. Weitzman<sup>[20]</sup>, si aplicamos un tipo de descuento más bajo (y, efectivamente, no discriminamos sobre la base de la fecha de nacimiento y nos preocupamos por los que vivirán en el siglo XXI y más allá), entonces consideraríamos que vale la pena hacer ahora una inversión para proteger a aquellas generaciones futuras frente a la peor de las situaciones hipotéticas.

Considere el lector esta analogía. Supongamos que los astrónomos han seguido la trayectoria de un asteroide y han calculado que impactaría en la Tierra en 2100, no con certeza sino con, pongamos por caso, un 10 % de probabilidad. ¿Nos relajáramos, diciendo que es un problema que puede dejarse de lado durante cincuenta años? Para entonces la gente será más rica, y puede resultar que, en cualquier caso, el asteroide pase de largo. No creo que lo hiciéramos. Habría un consenso en el sentido de que deberíamos empezar de inmediato y hacer todo lo humanamente posible para encontrar maneras de desviarlo o para mitigar sus efectos. Seríamos conscientes de que la mayoría de los niños de hoy en día seguirían estando vivos en 2100, y nos preocuparíamos por ellos.

(Incidentalmente, quisiera señalar que existe un contexto político en el que se aplica un tipo de descuento esencialmente cero: la eliminación de

residuos radiactivos, en la que se requiere que los almacenes situados a gran profundidad, como el depósito Onkalo que se está construyendo en Finlandia, y el que se propuso [pero que después se abortó] bajo Yucca Mountain en los Estados Unidos, eviten las pérdidas durante diez mil años, o incluso millones de años... lo que resulta irónico cuando no podemos planificar el resto de la política energética incluso con treinta años de antelación).

## **ENERGÍA LIMPIA (¿Y UN «PLAN B»?)**

¿Por qué razón los gobiernos responden con torpor a la amenaza climática? Es sobre todo porque las preocupaciones acerca de las generaciones futuras (y acerca de la gente en las partes más pobres del mundo) tienden a caer de la agenda política. De hecho, la dificultad de impulsar reducciones del CO<sub>2</sub> (por ejemplo, mediante un impuesto al carbono) es que el impacto de cualquier acción no solo reside en las décadas futuras, sino que es difuso a escala mundial. Los compromisos adoptados en la Conferencia de París de 2015, con la obligación de renovarlos y revisarlos cada cinco años, son un paso positivo. Pero las cuestiones que durante aquella conferencia consiguieron relevancia volverán a caer de la agenda a menos que exista una preocupación pública continuada, a menos que dichas cuestiones sigan apareciendo en las bandejas de entrada de los políticos y en la prensa.

En la década de 1960, Walter Mischel, un psicólogo de la Universidad de Stanford efectuó algunos experimentos clásicos. Ofreció a varios niños una elección: un malvavisco inmediatamente, o dos si esperaban quince minutos. Afirmaba que los niños que demoraban su gratificación se convirtieron en adultos más felices y con más éxito<sup>[21]</sup>. Esta es una metáfora adecuada para el dilema al que se enfrentan en la actualidad las naciones. Si se prioriza el resultado a corto plazo (la gratificación instantánea), entonces se pone en peligro el bienestar de las generaciones futuras. El horizonte de planificación para las políticas de infraestructuras y medioambientales necesita extenderse cincuenta o más años en el futuro. Si nos preocupan las generaciones futuras, no es ético ignorar los beneficios futuros (y la falta de beneficios) de la misma manera que lo haríamos si fuéramos un promotor inmobiliario que planea un edificio de oficinas. Y este tipo de descuento es un factor crucial en el debate de la política sobre el clima.

Son muchos los que tienen la esperanza de que nuestra civilización pueda fluir suavemente hacia un futuro bajo en carbono. Pero los políticos no

obtendrán mucha repercusión si defienden una aproximación esencial que signifique cambios desagradables en el estilo de vida, especialmente si los beneficios están lejos y sucederán en décadas futuras. Ciertamente, es más fácil obtener apoyos para la adaptación al cambio climático que para la mitigación, porque los beneficios de la primera se perciben localmente. Por ejemplo, el gobierno de Cuba, cuyas áreas costeras son especialmente vulnerables a los huracanes y a un aumento en el nivel del mar, ha formulado un plan cuidadosamente calculado que se extiende a lo largo de un siglo<sup>[22]</sup>.

No obstante, tres medidas que pueden mitigar el cambio climático parecen realistas desde el punto de vista político; de hecho, casi son medidas en las que todos ganan.

Primera, todos los países podrían mejorar la eficiencia energética y con ello ahorrar dinero realmente. Podría haber incentivos para conseguir un diseño «más verde» de los edificios. No se trata simplemente de un aislamiento mejorado; también requiere repensar la construcción. Para poner un ejemplo, cuando se derruye un edificio, algunos de sus elementos (por ejemplo, vigas de acero y tuberías de plástico) apenas se habrán degradado y podrían volverse a usar. Además, se podrían diseñar las vigas de manera más inteligente desde el principio, para que ofrecieran la misma resistencia con menos peso, con lo que se ahorraría en la producción de acero. Esto ejemplifica un concepto que está ganando terreno: la economía circular, en la que el objetivo es reciclar tanto material como sea posible<sup>[23]</sup>.

A menudo, los avances técnicos hacen que los electrodomésticos sean más eficientes. En este caso tendría sentido desechar los viejos, pero solo si la ganancia en eficiencia es al menos la suficiente para compensar el coste adicional de fabricar la versión moderna. Los electrodomésticos y los vehículos podrían diseñarse de manera más modular, de forma que pudieran mejorarse fácilmente sustituyendo sus partes en lugar de tirarlos. Se podría incentivar la fabricación de coches eléctricos, que podrían ser dominantes hacia 2040. Esta transición reduciría la contaminación (y el ruido) en las ciudades. Pero su efecto en los niveles de CO<sub>2</sub> depende, desde luego, de dónde procede la electricidad que carga las baterías.

La acción efectiva necesita un cambio de mentalidad. Es necesario que valoremos las cosas que duran mucho, y que instemos a los productores y a los minoristas a que prioricen la durabilidad. Necesitamos reparar y mejorar en lugar de sustituir. O prescindir de las cosas. Las reducciones simbólicas pueden hacer que nos sintamos virtuosos, pero no serán suficientes; si todos hacemos un poquito, solo conseguiremos un poquito.

Una segunda política en la que todos ganaríamos sería plantear recortes a las emisiones de metano, carbono negro (hollín) y CFC. Son contribuidores subsidiarios al calentamiento de efecto invernadero. Pero, a diferencia del CO<sub>2</sub>, también producen contaminación (en las ciudades chinas, por ejemplo), de modo que existe un fuerte incentivo para reducirlas. (En los países europeos, el esfuerzo para reducir la contaminación ha empezado con una desventaja. En la década de 1990 hubo presiones a favor de los vehículos con motor diésel debido a su mayor ahorro de combustible. Solo ahora se está invirtiendo esta tendencia debido a que dichos vehículos emiten micropartículas contaminantes que ponen en peligro la vida saludable en las ciudades).

Pero la tercera medida es la más crucial. Las naciones deben expandir la investigación y desarrollo (I+D) a todas las formas de generación de energía baja en carbono (renovables, nuclear de cuarta generación, fusión, y el resto) y a otras tecnologías en las que es fundamental el avance en paralelo, en especial el almacenamiento y las redes inteligentes. Esta es la razón por la que un resultado alentador de la Conferencia de París de 2015 fue una iniciativa denominada Misión Innovación. La pusieron en marcha el presidente Obama y el primer ministro de la India, Narendra Modi, y fue respaldada por los países del G7 más la India, China y otras nueve naciones. Cabe esperar que estos Estados se comprometan a doblar su inversión pública en I+D en energía limpia para el año 2020 y que coordinen esfuerzos. Este objetivo es modesto. En la actualidad, solo el 2 % de la I+D se dedica a estos objetivos. ¿Por qué no debería ser este porcentaje comparable al que se dedica a los gastos en investigación médica o en defensa? Bill Gates y otros filántropos privados han prometido un compromiso similar.

El impedimento para «descarbonizar» la economía global es que todavía es caro generar energía renovable. Cuanto más rápidamente avancen estas tecnologías «limpias», más pronto caerá su precio, de manera que se las podrán permitir los países en desarrollo, donde se necesitará más capacidad de generación, donde la salud de los pobres es puesta en peligro por fogones humeantes que queman madera o estiércol, y donde de otro modo se presionaría para construir centrales energéticas alimentadas con carbón.

El Sol proporciona cinco mil veces más energía a la superficie de la Tierra que toda nuestra demanda humana de energía. Brilla con especial intensidad en Asia y África, donde se predice que la demanda de energía aumentará más rápidamente. A diferencia de los combustibles fósiles, no produce contaminación, ni hay mineros que mueran. A diferencia de la fisión



nuclear, no deja residuos radiactivos. La energía solar ya es competitiva para miles de aldeas de la India y África que están fuera de la red. Pero a una escala mayor sigue siendo más cara que los combustibles fósiles y solo resulta viable desde el punto de vista económico gracias a subsidios o a tarifas incentivadas. Pero, a la larga, estos subsidios tendrán que acabar.

Si el Sol (o el viento) se han de convertir en la fuente primaria de nuestra energía, tiene que haber alguna forma de almacenarla, de manera que siga habiendo una reserva de energía durante la noche o en aquellos días en los que no sopla el viento. Ya se realiza una gran inversión en mejorar las baterías y en hacerlas mayores. A finales de 2017, la compañía Solar City, de Elon Musk, instaló una serie de baterías de ion-litio con una capacidad de 100 megavatios en una localidad del sur de Australia. Otras posibilidades de almacenamiento de energía incluyen el almacenamiento térmico, condensadores, aire comprimido, volantes, sal licuada, bombeo hidroeléctrico e hidrógeno.

La transición a los coches eléctricos ha proporcionado un estímulo a la tecnología de baterías (los requisitos para las baterías de automóviles son más exigentes que los que hay para las domésticas, o «granjas de baterías», en términos de peso y velocidad de recarga). Necesitaremos redes de corriente continua de alto voltaje (CCAV) para que transmitan de manera eficiente a grandes distancias. A la larga, estas redes eléctricas tendrán que ser transcontinentales (para transportar energía desde África del Norte y España a la Europa septentrional menos soleada, y entre el este y el oeste para suavizar los picos de demanda a lo largo de las diferentes zonas horarias en Norteamérica y Eurasia).

Será difícil pensar en un reto más inspirador para los ingenieros jóvenes que diseñar sistemas de energía limpia para el mundo.

Otros métodos de generación de energía aparte del Sol y el viento tienen nichos geográficos. La energía geotérmica está disponible con facilidad en Islandia; la energía del oleaje puede ser factible, pero desde luego es tan errática como el viento. Domeñar la energía de las mareas parece atractivo (suben y bajan de manera predecible), pero en la actualidad es poco prometedor, excepto en unos pocos lugares en los que la topografía conduce a un recorrido mareal especialmente elevado. La costa occidental de Gran Bretaña, con un recorrido mareal de más de 15 metros, es uno de tales lugares, y se han hecho estudios de viabilidad de cómo unas turbinas podrían extraer energía de los flujos de marea rápidos inducidos por la marea alrededor de algunos cabos y promontorios. Un dique situado a través del

amplio estuario del río Severn podría producir tanta electricidad como varias centrales nucleares. Pero esta propuesta sigue siendo polémica debido a la preocupación por su impacto ecológico. Un plan alternativo implica lagunas mareales, creadas mediante la construcción de terraplenes para cerrar áreas de varios kilómetros de extensión. La diferencia entre el nivel del mar dentro y fuera se emplea para accionar turbinas. Estas lagunas tienen la virtud de que el coste en capital es en tecnología sencilla y en movimientos de tierra duraderos, que pueden amortizarse a lo largo de siglos.

Las predicciones actuales sugieren que pueden pasar varias décadas antes de que las fuentes de energía limpia satisfagan todas nuestras necesidades, especialmente en el mundo en desarrollo. Por ejemplo, si la energía solar y el almacenamiento mediante hidrógeno y baterías son inadecuados (y ahora mismo estas parecen las mejores opciones), entonces todavía se necesitarán refuerzos hasta mediados del siglo. La energía del gas sería aceptable si se combinara con el secuestro de carbono (captura y almacenamiento de carbono, CAC), en el que se extrae CO<sub>2</sub> de los gases de escape de la central energética y después se transporta y se almacena bajo tierra de manera permanente.

Hay quien dice que sería ventajoso reducir realmente la concentración de CO<sub>2</sub> hasta que alcanzase su nivel preindustrial: secuestrar no solo la emisión futura por parte de las centrales energéticas sino también «succionar» lo que se ha emitido en el último siglo. Las razones para ello no son evidentes. No hay nada «óptimo» en el clima del siglo xx; lo que es perjudicial es que la tasa antropogénica de cambio ha sido más rápida que los cambios naturales en el pasado, y por lo tanto no ha sido fácil para nosotros ni para el mundo natural ajustarnos a él. Pero si se creyera que esta reducción valiera la pena, hay dos maneras de conseguirla. Una es la extracción directa de la atmósfera; esto es posible, pero ineficiente, porque el CO<sub>2</sub> es solo el 0,02 % del aire. Otra técnica es cultivar plantas, que desde luego captan CO<sub>2</sub> de la atmósfera, utilizarlas como biocombustibles y después capturar (y enterrar) el CO<sub>2</sub> que se reemite en la central energética cuando estas se queman. En principio esto está bien, pero es problemático debido a la cantidad de tierra necesaria para hacer crecer los biocombustibles (que de otro modo estaría disponible para hacer crecer plantas destinadas a la alimentación, o bien se conservaría como bosques naturales), y porque el secuestro permanente de los miles de millones de toneladas de CO<sub>2</sub> no es algo fácil. Una variante de alta tecnología sería utilizar «hojas artificiales» para incorporar directamente CO<sub>2</sub> como combustible.

¿Cuál es el papel de la energía nuclear? Yo estaría a favor de que el Reino Unido y los Estados Unidos tengan al menos una generación de sustitución de plantas de energía nuclear. Pero los riesgos de un accidente nuclear, aunque son improbables, causan ansiedad; la opinión pública y política es volátil. Después del desastre de Fukushima Daiichi en 2011, el sentimiento antinuclear se disparó no solo en Japón (cosa nada sorprendente), sino también en Alemania. Además, no podemos sentirnos cómodos con un programa mundial de energía nuclear a menos que se establezcan bancos de combustible regulados internacionalmente para proporcionar uranio enriquecido y eliminar y almacenar los residuos, más un código de seguridad que se haga cumplir de manera estricta para evitar riesgos análogos a los de las líneas aéreas de alto riesgo, y un firme acuerdo de no proliferación para impedir el desvío de material radiactivo hacia la producción de armamento.

A pesar de la ambivalencia de la energía nuclear ampliamente extendida, vale la pena impulsar la I+D en una variedad de conceptos de cuarta generación, que podrían resultar ser más flexibles en cuanto a tamaño, y más seguros. La industria ha estado relativamente inactiva durante los últimos veinte años, y los diseños actuales se remontan a la década de 1960 o antes. En particular, vale la pena estudiar la economía de reactores nucleares pequeños, modulares y estandarizados, que podrían construirse en número sustancial y que serían lo bastante pequeños para montarse en una fábrica antes de transportarse a la localidad final. Además, algunos diseños de la década de 1960 merecen reconsiderarse, en particular el reactor basado en torio, que tiene la ventaja de que el torio es más abundante en la corteza de la Tierra que el uranio, y también produce menos residuos peligrosos.

Desde la década de 1950 se han realizado intentos de aprovechar la fusión nuclear, el proceso que proporciona energía al Sol, pero su historia está llena de horizontes que retroceden; la energía de fusión comercial se halla todavía al menos a treinta años de distancia. El reto es emplear fuerzas magnéticas para confinar gas a una temperatura de millones de grados (tan caliente como el centro del Sol) y elaborar materiales que resistan una irradiación prolongada para contener el reactor. A pesar de su coste, el rendimiento potencial de la fusión es tan grande que vale la pena continuar desarrollando experimentos y prototipos. La mayor de estas investigaciones es el Reactor Termonuclear Experimental Internacional (ITER), en Francia. Proyectos similares, pero a una escala menor, se están llevando a cabo en Corea, el Reino Unido y los Estados Unidos. Una idea alternativa, según la cual haces convergentes de láseres inmensos inciden e implosionan

minúsculas pellas de deuterio, se lleva a cabo en el Laboratorio Nacional Lawrence Livermore, en los Estados Unidos, pero esta Instalación Nacional de Ignición es, sobre todo, un proyecto de defensa que proporcionará sustitutos a escala del laboratorio para ensayos de bombas H; la promesa de la energía de fusión controlada son unos paños calientes políticos.

Un «factor de terror», y una sensación de impotencia, exagera el temor público a la radiación. Como consecuencia, todos los proyectos de fisión y fusión resultan obstaculizados por una preocupación desproporcionada acerca de niveles de radiación incluso muy bajos.

El tsunami de 2011 en Japón se cobró treinta mil vidas, la mayoría de las cuales se ahogaron. También destruyó las centrales nucleares de Fukushima Daiichi, que no se hallaban adecuadamente protegidas contra un muro de agua de quince metros de alto y cuyo diseño era subóptimo (por ejemplo, los generadores de emergencia estaban situados muy bajos, y la inundación los desactivó). En consecuencia, hubo fuga y dispersión de los materiales radiactivos. Los pueblos del entorno se evacuaron de manera descoordinada (inicialmente, solo los que estaban a tres kilómetros de las centrales nucleares, después los que se hallaban a veinte kilómetros, y después a treinta), y sin tener en cuenta adecuadamente la manera asimétrica en que el viento esparcía la contaminación. Algunos evacuados tuvieron que desplazarse tres veces. Y algunos pueblos siguen deshabitados, con consecuencias devastadoras para la vida de sus residentes más antiguos. En realidad, el trauma mental y otros problemas de salud como la diabetes han resultado más debilitadores que el riesgo de radiación. Muchos evacuados, especialmente los ancianos, estarían preparados para aceptar un riesgo de cáncer sustancialmente mayor a cambio de la libertad de vivir sus últimos días en un entorno familiar. Deberían tener esta opción. (Asimismo, las evacuaciones en masa después del desastre de Chernóbil no se hicieron necesariamente para el mayor beneficio de los que fueron desplazados).

Unas normas excesivamente rigurosas acerca de los peligros de la radiación de bajo nivel empeoran toda la economía de la energía nuclear. Después de desmantelar el reactor «reproductor rápido» experimental de Dounreay en el norte de Escocia, se están gastando miles de millones de libras esterlinas en una «limpieza temporal» entre hoy y la década de 2030, a la que seguirá más gasto repartido a lo largo de décadas posteriores. Y se han presupuestado cerca de 100 000 millones de libras, a lo largo del próximo siglo, para restaurar los «campos verdes» de las instalaciones nucleares de Sellafield en Inglaterra. Otra preocupación política es la siguiente: si el centro

de una ciudad fuera atacado por una «bomba sucia» (una explosión química convencional mezclada con material radiactivo) se necesitaría algún tipo de evacuación. Pero, al igual que en Fukushima, las normas actuales conducirían a una respuesta que sería excesivamente drástica, tanto en el alcance como en la duración de la evacuación. La situación inmediatamente posterior a un incidente nuclear no es el momento óptimo para un debate equilibrado. Esta es la razón por la que esta cuestión necesita ahora una nueva valoración y una amplia difusión de normas claras y apropiadas.

¿Qué ocurrirá realmente en el frente del clima? Mi suposición pesimista es que los esfuerzos políticos para descarbonizar la producción de energía no ganarán terreno, y que la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera aumentará a un ritmo acelerado durante los próximos veinte años, aunque se respeten los compromisos de París. Pero para entonces sabremos con mucha más seguridad (debido a una base de datos más extensa y a mejores modelos) lo importante que es realmente la retroalimentación debida al vapor de agua y las nubes. Si la «sensibilidad climática» es baja, podremos relajarnos. Pero si es elevada, y en consecuencia el clima parece hallarse en una trayectoria irreversible hacia territorio peligroso (siguiendo las situaciones hipotéticas más acusadas del aumento de temperatura del quinto informe del IPCC), entonces puede que exista una presión para «medidas de pánico». Esto podría implicar un «plan B»: ser fatalista acerca de continuar la dependencia de los combustibles fósiles, pero combatir los efectos de la liberación de CO<sub>2</sub> a la atmósfera mediante una inversión masiva en captura y almacenamiento de carbono en todas las centrales energéticas accionadas por combustibles fósiles.

De manera más discutible, se podría controlar activamente el clima mediante geoingeniería<sup>[24]</sup>. El «calentamiento de efecto invernadero» podría contrarrestarse, por ejemplo, colocando aerosoles reflectantes en la alta atmósfera, o incluso enormes parasoles en el espacio. Parece factible lanzar el suficiente material a la estratosfera para cambiar el clima del mundo; de hecho, lo que es alarmante es que esto podría hallarse al alcance de los recursos de una sola nación, o quizá incluso de una sola compañía. Los problemas políticos de una geoingeniería de este tipo podrían ser abrumadores. Podrían producirse efectos colaterales involuntarios. Además, el calentamiento podría volver con ganas si las contramedidas llegaran a interrumpirse, y no se impedirían otras consecuencias de unos niveles

elevados de CO<sub>2</sub> (especialmente los efectos negativos de la acidificación de los océanos).

La geoingeniería de este tipo sería una pesadilla política absoluta; no todas las naciones querrían ajustar el termostato de la misma manera. Se necesitarían modelos climáticos muy complejos con el fin de calcular los impactos regionales de cualquier intervención artificial. ¡Para los abogados sería una época de vacas gordas si se pudiera acusar del mal tiempo a un individuo o a una nación! (Adviértase, sin embargo, que un tipo de remedio diferente, la extracción directa del CO<sub>2</sub> de la atmósfera, no generaría inquietud. Ahora esto no parece factible desde el punto de vista económico, pero es inobjetable debido a que se trataría simplemente de deshacer la geoingeniería que los humanos ya han perpetrado mediante la quema de combustibles fósiles).

A pesar de sus características poco atractivas, vale la pena explorar la geoingeniería para clarificar qué opciones tienen sentido y quizá para calmar el excesivo optimismo de una «solución rápida» técnica para nuestro clima. También sería sensato poner en orden las complejas cuestiones de gobierno planteadas, y asegurarse de que estas queden clarificadas antes de que el cambio climático se haga tan grave que exista presión para una acción urgente.

Tal como se destacó en la introducción, esta es la primera época en la que la humanidad puede afectar a todo el hábitat de nuestro planeta: el clima, la biosfera y el suministro de recursos naturales. Los cambios tienen lugar a una escala temporal de décadas. Esto es mucho más rápido que los cambios naturales que tuvieron lugar durante el pasado geológico; por otra parte, es lo bastante lento para darnos tiempo, colectivamente o a una escala nacional, para planear una respuesta, para mitigar un cambio climático o adaptarnos a él y modificar los estilos de vida. Tales ajustes son posibles en principio... aunque un motivo deprimente que aparece a lo largo de todo el libro es la brecha entre lo que es técnicamente deseable y lo que ocurre en realidad.

Hemos de ser evangelistas de las nuevas tecnologías; sin ellas careceremos de mucho de lo que hace que nuestra vida sea mejor que la vida de las generaciones anteriores. Sin la tecnología, el mundo no puede proporcionar alimento, ni energía sostenible, para una población en expansión y más exigente. Pero necesitamos que dicha tecnología esté dirigida sabiamente. Los sistemas de energía renovable, los avances médicos y la producción de alimentos con alta tecnología (la carne artificial, etc.) son objetivos sensatos; las técnicas de geoingeniería probablemente no lo sean.

Sin embargo, los descubrimientos científicos y técnicos pueden producirse de manera tan rápida e impredecible que quizá no podamos manejarlos adecuadamente; será todo un reto aprovechar sus beneficios al tiempo que evitamos sus aspectos negativos. Las tensiones entre las promesas y los riesgos de la nueva tecnología son el tema de los capítulos siguientes.

# 2

## EL FUTURO DE LA HUMANIDAD EN LA TIERRA

### BIOTECNOLOGÍA

A Robert Boyle se le recuerda mejor en la actualidad por la «ley de Boyle», que relaciona la presión y la densidad de los gases. Boyle era uno de los «caballeros ingeniosos y curiosos» que, en 1660, fundaron la Royal Society de Londres, que existe todavía como la academia de las ciencias del Reino Unido. Estos hombres (no había mujeres entre ellos) se habrían denominado «filósofos naturales» (el término «científico» no existió hasta el siglo XIX); en palabras de Francis Bacon, cuyos escritos les influyeron mucho, eran «mercaderes de luz», que buscaban la iluminación<sup>[25]</sup> por su propio bien; pero también eran hombres prácticos que se preocupaban por los problemas de su época, y que pretendían (para citar de nuevo a Bacon) «el alivio del estado del hombre».

Boyle era un erudito. Después de su muerte en 1691, entre sus papeles se encontró una nota manuscrita con una «lista de deseos» de invenciones que beneficiarían a la humanidad<sup>[26]</sup>. En el pintoresco idioma de su época, previó determinados avances que ahora se han logrado, y algunos que todavía se nos escapan más de tres siglos después. He aquí parte de su lista:

1. La prolongación de la vida.
2. La recuperación de la juventud, o al menos de algunos de sus rasgos, como nuevos dientes, nuevo cabello del color que tenía en la juventud.
3. El arte de volar.
4. El arte de continuar mucho tiempo bajo el agua, y de ejercer allí funciones libremente.
5. Gran fortaleza y agilidad del cuerpo, ejemplificadas por la de las personas epilépticas, frenéticas e histéricas.
6. La aceleración de la producción de cosas a partir de semillas.
7. La producción de vidrios parabólicos e hiperbólicos.
8. La manera viable y segura de encontrar longitudes.
9. Drogas potentes para alterar o exaltar la imaginación, la vigilia, la memoria y otras funciones, y para calmar el dolor, procurar el sueño



inocente, sueños inocuos, etc.

10. Una luz perpetua.
11. La transmutación de especies en minerales, animales y vegetales.
12. Alcanzar dimensiones gigantescas.
13. Librarse de la necesidad de dormir mucho, ejemplificada por las operaciones del té y lo que les ocurre a los locos, y de estimulantes para mantenernos despiertos<sup>[27]</sup>.

Cualquier persona del siglo xvii de Boyle se asombraría ante el mundo moderno, mucho más de lo que un romano lo habría hecho ante el mundo de Boyle. Además, muchos cambios se están acelerando todavía. Las nuevas tecnologías (bio, ciber e IA) serán transformadoras de maneras que son difíciles de predecir incluso para dentro de una década. Tales tecnologías pueden ofrecer nuevas soluciones a las crisis que amenazan a nuestro mundo superpoblado; por otra parte, pueden crear vulnerabilidades que nos proporcionen un recorrido más accidentado por este siglo. Los progresos ulteriores dependerán de nuevos descubrimientos que surjan de los laboratorios de investigación, de manera que la velocidad del avance es especialmente impredecible; ello contrasta, por ejemplo, con la energía nuclear, que se basa en la física del siglo xx, y con las transformaciones del siglo xix que produjeron el vapor y la electricidad.

Una tendencia de la biotecnología que merece titulares ha sido el coste de secuenciar el genoma, que ha caído en picado. El «primer esbozo del genoma humano» era «ciencia a lo grande»: un proyecto internacional con un presupuesto de tres mil millones de dólares. Su finalización se anunció en una conferencia de prensa en la Casa Blanca en junio de 2000. Pero en 2018 el coste ha caído por debajo de los mil dólares. Pronto será algo rutinario para todos nosotros tener secuenciado nuestro genoma, lo que planteará la pregunta de si queremos saber realmente si somos portadores de genes que nos confieran una propensión a determinadas enfermedades<sup>[28]</sup>.

Pero ahora hay una línea paralela: la capacidad más rápida y más barata de *sintetizar* genomas. Ya en 2004 se sintetizó el virus de la poliomielitis, un anuncio de lo que iba a suceder. En 2018, la técnica se halla ahora muy avanzada. Efectivamente, Craig Venter, el biotecnólogo y empresario estadounidense, está desarrollando un sintetizador génico que es, realmente, una impresora 3D para códigos genéticos. Aunque solo sea capaz de reproducir genomas cortos, esto podría tener diversas aplicaciones. El «código» para una vacuna podría transmitirse electrónicamente alrededor del

mundo, lo que permitiría una distribución instantánea y global de una vacuna creada para contrarrestar una nueva epidemia.

Las personas se sienten típicamente incómodas acerca de innovaciones que parecen «contra natura» y que plantean riesgos. La vacunación y los trasplantes de corazón, por ejemplo, generaron controversia en el pasado. Más recientemente, la preocupación se ha centrado en la investigación con embriones, en los trasplantes mitocondriales y en las células madre. Yo seguí atentamente el debate en el Reino Unido que condujo a una legislación que permite los experimentos en embriones hasta los catorce días de edad. Este debate estuvo bien gestionado; se caracterizó por la implicación constructiva entre los investigadores, los parlamentarios y el público en general. Hubo oposición desde la Iglesia católica, algunos de cuyos representantes hicieron circular panfletos que representaban a un embrión de catorce días de edad como un «homúnculo» estructurado. Los científicos destacaron adecuadamente lo engañoso que era esto; un embrión en un estadio tan primitivo es realmente un grupo de células microscópicas y todavía no diferenciadas. Pero los oponentes más refinados respondían: «Lo sé, pero sigue siendo sagrado»; y frente a esta creencia la ciencia no puede ofrecer ningún contraargumento.

En cambio, el debate sobre plantas y animales genéticamente modificados (GM) se gestionó menos bien en el Reino Unido. Incluso antes de que el público se hubiera implicado completamente, hubo un empate entre Monsanto, una gigantesca compañía agroquímica, y los ecologistas. Se acusó a Monsanto de explotar a los agricultores en el mundo en desarrollo al obligarlos a comprar semillas cada año. El público en general estuvo influido por una campaña en los medios contra los «alimentos Frankenstein». Hubo un factor «puaj» cuando nos enteramos de que los científicos podían «crear» conejos que resplandecen en la oscuridad... una versión agravada de la aversión que muchos de nosotros sentimos a la explotación de los animales en los circos. A pesar del hecho de que trescientos millones de norteamericanos han consumido plantas GM durante toda una década, sin daños manifiestos, estas siguen estando severamente restringidas en el seno de la Unión Europea. Y, tal como se mencionó en el tercer apartado del capítulo 1, los que hacen campaña contra las plantas genéticamente modificadas han impedido que se proporcionen alimentos GM a niños malnutridos para combatir deficiencias en su dieta. Pero existen preocupaciones genuinas de que la diversidad genética reducida en cultivos fundamentales (trigo, maíz, etc.) podría hacer

que los recursos alimentarios del mundo fueran más vulnerables a las enfermedades de las plantas.

La nueva tecnología de edición de genes, CRISPR/Cas9, podría modificar las secuencias génicas de una manera más aceptable que otras técnicas previas. CRISPR/Cas9 produce pequeños cambios en las secuencias de ADN para suprimir genes perjudiciales (o alterar su expresión). Pero no «cruza la barrera de las especies». En los humanos, este uso totalmente benigno y nada conflictivo de la edición génica elimina genes concretos que causan enfermedades específicas.

La fecundación *in vitro* (FIV) ya proporciona una manera menos invasiva que la CRISPR/Cas9 de eliminar genes perjudiciales. En este procedimiento, después del tratamiento hormonal para inducir la ovulación, se recogen varios óvulos, se fecundan *in vitro* y se deja que los huevos se desarrollen hasta un estadio temprano. Después, se comprueba una célula de cada embrión en busca de la presencia del gen indeseable, y el huevo que está libre de dicho gen se implanta en la madre para una gestación normal.

Ahora se dispone de una técnica diferente que puede sustituir una categoría concreta de genes defectuosos. Parte del material genético de una célula se encuentra en orgánulos llamados mitocondrias; estas están separadas del núcleo de la célula. Si un gen defectuoso es mitocondrial, es posible sustituirlo con mitocondrias procedentes de otra hembra, lo que conduce a «bebés de tres padres». Esta técnica la legalizó el Parlamento del Reino Unido en 2015. El paso siguiente sería emplear edición génica en el ADN del núcleo celular.

En la mente del público, existe una clara distinción entre intervenciones médicas artificiales que eliminan algo dañino y utilizar técnicas similares para ofrecer una «mejora». La mayoría de las características (tamaño, inteligencia, etc.) están determinadas por un agregado de muchos genes. Solo cuando se disponga del ADN de millones de personas será posible (utilizando sistemas de reconocimiento de patrones con ayuda de IA) identificar la combinación relevante de genes. A corto plazo, este conocimiento podría utilizarse para informar la selección de embriones para la fecundación *in vitro*. Pero la modificación o el rediseño del genoma es una perspectiva más remota (y, desde luego, más arriesgada y dudosa). Hasta que esto pueda hacerse (y hasta que pueda secuenciarse artificialmente ADN con la prescripción requerida) no serán concebibles (en los dos sentidos de este término) «bebés diseñados». No está claro cuántos padres desearían realmente tener hijos «mejorados» de esta manera (en oposición a la edición de un único gen, que es más factible,

necesario para eliminar la propensión a enfermedades o discapacidades específicas). En la década de 1980, en California se estableció el Repositorio para la Elección Germinal con el objetivo de permitir la concepción de «bebés diseñados»; se trataba de un banco de esperma al que se calificó como «banco de esperma de los premios Nobel», con solo donantes de «élite», entre ellos William Shockley, coinventor del transistor y ganador de un premio Nobel, que alcanzó cierta notoriedad en etapas más avanzadas de su vida por ser un defensor de la eugenesia. Le sorprendió (aunque probablemente a la mayoría de nosotros nos satisfizo) que no hubiera gran demanda.

Los avances en medicina y cirugía que ya se han logrado (y los que podemos esperar con seguridad en las décadas venideras) se aplaudirán como una bendición clara. No obstante, pondrán de manifiesto algunas cuestiones éticas, en particular, harán más agudos los dilemas implicados en tratar a los que se encuentran en el principio mismo de su vida o en el fin de esta. Cualquier extensión saludable de nuestra vida será bienvenida. Pero lo que se hará más problemático es la brecha creciente entre cuánto tiempo sobrevivamos como ancianos saludables y cuánto tiempo más puede extenderse un determinado tipo de vida mediante medidas extremas. Muchos de nosotros elegiríamos solicitar la no resurrección, y solo tratamientos paliativos, tan pronto como nuestra calidad de vida y nuestro pronóstico cayera por debajo de un determinado umbral. Sentimos pavor a que se nos mantenga durante años atenazados por una demencia avanzada, que supone una sangría de recursos y de la simpatía de los demás. De manera parecida, hemos de preguntarnos si los esfuerzos para salvar a bebés prematuros extremos o dañados de manera irreversible han ido demasiado lejos. A finales de 2017, por ejemplo, un equipo de cirujanos del Reino Unido intentó (con un compromiso y una dedicación inmensos) salvar a una niña nacida con el corazón fuera del cuerpo.

Bélgica, Holanda, Suiza y varios estados de los Estados Unidos han legalizado la «muerte asistida», con lo que aseguran que se pueda ayudar a una persona de mente sana con una enfermedad terminal a tener una muerte tranquila. Los familiares, o los médicos y sus ayudantes, pueden llevar a cabo los procedimientos necesarios sin que se les amenace con la acusación criminal de haber «colaborado en un suicidio». Nada parecido tiene todavía la aprobación parlamentaria en el Reino Unido. Las objeciones se basan en cuestiones religiosas fundamentales, en la idea de que la participación en tales actos es contraria al código ético de un médico, y en la preocupación de que personas vulnerables puedan sentirse presionadas a tomar esta decisión por

sus familiares o por la excesiva preocupación por plantear pesadas exigencias a los demás. Esta inacción persiste en el Reino Unido, a pesar del 80 % de respaldo público a la «muerte asistida». Yo pertenezco decididamente a este 80 %. Saber que sería posible esta opción confortaría a muchos más de los que realmente harían uso de ella. Es evidente que la medicina y la cirugía moderna son buenas para la mayoría de nosotros durante la mayor parte de nuestra vida, y podemos esperar más progresos en las décadas futuras que puedan prolongar la vida de personas saludables. No obstante, creo (y espero) que habrá una presión creciente para legalizar la eutanasia bajo condiciones reguladas.

Otra consecuencia de los avances en medicina es la difuminación de la transición entre la vida y la muerte. En la actualidad la muerte se define normalmente como «muerte cerebral»: la fase en la que todas las señales medibles de actividad cerebral se han extinguido. Este es el criterio que los médicos de trasplantes emplean para decidir cuándo pueden «cosechar» adecuadamente los órganos de un cuerpo. Pero la línea se difumina todavía más por propuestas según las cuales se puede hacer funcionar de nuevo el corazón después de la «muerte cerebral», simplemente para mantener los órganos previstos «frescos» durante más tiempo. Esto introduce más ambigüedad moral en la cirugía de trasplantes. Ya existen «agentes» que inducen a bangladesíes empobrecidos a vender un riñón u otro órgano que se revenderá con un enorme sobrepeso para beneficiar a ricos receptores potenciales. Y todos hemos visto por televisión grabaciones angustiosas de una madre con un hijo enfermo suplicando que «está desesperada aguardando un donante»; desesperada, en otras palabras, por que otro niño muera, quizá de un accidente fatal, para que proporcione el órgano necesario. Estas ambigüedades morales, junto con una escasez de donantes de órganos, continuarán (y de hecho se agravarán) hasta que los xenotrasplantes (emplear órganos para uso humano procedentes de cerdos o de otros animales) se hagan rutinarios y seguros. Mejor todavía (aunque más futuristas), unas técnicas equivalentes a las que se desarrollan para producir carne artificial podrían permitir la impresión en 3D de órganos de sustitución. Estos son avances a los que debería darse prioridad.

Los avances en microbiología (diagnósticos, vacunas y antibióticos) ofrecen perspectivas de mantener la salud, controlar la enfermedad y contener las pandemias. Pero estos beneficios han desencadenado un peligroso «contraataque» por parte de los mismos patógenos. Existe preocupación sobre la resistencia a los antibióticos, por la que las bacterias evolucionan (mediante

una selección darwiniana acelerada) para ser inmunes ante los antibióticos utilizados para eliminarlas. Esto ha conducido, por ejemplo, a una reaparición de la tuberculosis. A menos que se desarrollen nuevos antibióticos, los riesgos de infecciones intratables después de intervenciones quirúrgicas, por ejemplo, aumentarán hasta el nivel de hace un siglo. A corto plazo, es urgente evitar el empleo excesivo de antibióticos (por ejemplo, en el ganado en Estados Unidos) e incentivar el desarrollo de nuevos antibióticos, aunque estos sean menos lucrativos para las compañías farmacéuticas que las medicinas que controlan las enfermedades de larga duración.

Y los estudios de virus, realizados con la esperanza de desarrollar a partir de ellos vacunas mejoradas, tienen aspectos polémicos. Por ejemplo, en 2011, dos grupos de investigación, uno en Holanda y otro en Wisconsin, demostraron que era sorprendentemente fácil hacer que el virus H5N1 de la gripe fuera a la vez más virulento y más transmisible, en contraste con la tendencia natural, en la que estas dos características están correlacionadas negativamente. La justificación para realizar estos experimentos era que, yendo un paso por delante de las mutaciones naturales, sería más fácil preparar vacunas a tiempo. Pero, para muchos, este beneficio quedaba sobrepasado por los riesgos aumentados de la liberación accidental de virus peligrosos, más la amplia disseminación de técnicas que podrían ser útiles para bioterroristas. En 2014, el gobierno de los Estados Unidos dejó de financiar estos experimentos denominados de aumento de función... pero en 2017 esta prohibición se flexibilizó. En 2018 se publicó un artículo que informaba de la síntesis del virus de la viruela equina, con la implicación de que podía sintetizarse de forma parecida un virus de la viruela humana<sup>[29]</sup>. Algunos pusieron en cuestión la justificación de dicha investigación, porque ya existe un virus de la viruela que es seguro y está almacenado; otros adujeron que incluso si la investigación fuera justificable, la publicación fue un error.

Tal como se ha dicho, los experimentos que emplean técnicas CRISPR/Cas9 en embriones humanos plantean preocupaciones éticas. Y el rápido progreso de la biotecnología generará más casos en los que habrá preocupación por la seguridad de los experimentos, la disseminación de «conocimientos peligrosos» y la ética de cómo estos se aplican. Los procedimientos que afectan no únicamente a un individuo, sino a su progenie (al alterar la línea germinal) son inquietantes. Por ejemplo, ha habido un intento, con un éxito del 90 %, de convertir en estéril, y por lo tanto eliminar, la especie de mosquito que difunde las cepas de virus del dengue y del Zika. En el Reino Unido se ha invocado un «impulso génico» para eliminar a las

ardillas grises, consideradas una «plaga» que amenaza a la especie común, más adorable. (Una táctica más benigna es modificar a la ardilla común de manera que pueda resistir al parapoxvirus que las ardillas grises difunden). Se están proponiendo técnicas similares que podrían preservar la ecología única de las islas Galápagos al eliminar a las especies invasoras, en particular la rata negra o campestre. Pero vale la pena señalar que en un libro reciente, *Inheritors of the Earth*, Chris Thomas, un ecólogo distinguido, aduce que la propagación de especies suele tener un impacto positivo al asegurar una ecología más variada y robusta<sup>[30]</sup>.

En 1975, en los primeros días de la investigación del ADN recombinante, un grupo de biólogos moleculares de primera línea se reunió en el Asilomar Conference Grounds, en Pacific Grove, California, y allí acordaron directrices que definían qué experimentos debían hacerse y cuáles no. Este precedente en apariencia incentivador desencadenó diversas reuniones, convocadas por academias nacionales, para debatir los descubrimientos recientes con el mismo espíritu. Sin embargo, en la actualidad, más de cuarenta años después de la primera reunión de Asilomar, la comunidad investigadora es mucho más internacional, y está más influida por las presiones comerciales. Me preocupa que cualesquiera normas que se impongan, sobre bases de prudencia o éticas, no podrán hacerse cumplir en todo el mundo, del mismo modo que no puede hacerse con las leyes sobre drogas o sobre impuestos. Aquello que pueda hacerse lo hará alguien, en algún lugar. Y esto es una pesadilla. En contraste con el equipo complejo, conspicuo y especializado necesario para crear un arma nuclear, la biotecnología implica equipos de pequeña escala y de uso dual. De hecho, el biopiratero es pujante, incluso como un pasatiempo y un juego competitivo.

En 2003 me preocupaban estos peligros y calculé que la posibilidad de un bioerror o de bioterrorismo que condujera a millones de muertos sería del 50 % en 2020. Me sorprendió descubrir cuántos de mis colegas pensaban que una catástrofe era más probable incluso de lo que yo había estimado. Sin embargo, en fecha más reciente, el psicólogo y autor Steven Pinker aceptó esta apuesta mía y se jugó doscientos dólares. Es esta una apuesta que espero perder fervientemente, pero no me sorprendió que el autor de *The Better Angels of Our Nature*<sup>[31]</sup> adoptara una postura optimista. Pinker cita estadísticas que indican una tendencia a la baja en la violencia y el conflicto, una reducción que ha enmascarado el hecho de que las redes mundiales de noticias informan de desastres de los que en épocas anteriores no se habría informado. Pero esta tendencia puede adormecernos en una confianza

indebida. En el mundo financiero, las ganancias y las pérdidas son asimétricas; muchos años de ganancias graduales pueden arruinarse por una pérdida repentina. En la biotecnología y las pandemias, el riesgo está dominado por los acontecimientos raros pero extremos. Además, dado que la ciencia nos empodera más, y puesto que nuestro mundo está tan interconectado, la magnitud de las peores catástrofes potenciales se ha crecido como nunca antes, y son demasiados los que se niegan a aceptarlo.

Por cierto, los efectos sociales secundarios debidos a una pandemia serían mucho mayores que en siglos anteriores. Las aldeas europeas de mediados del siglo XIV continuaron funcionando aunque la peste negra casi redujo a la mitad su población; los supervivientes se resignaban ante una mortandad masiva. En contraste, la sensación de que se tiene derecho a algo es tan fuerte en los países ricos actuales que se produciría una crisis en el orden social tan pronto como los hospitales quedaran desbordados, los obreros clave se quedaran en casa y los servicios sanitarios se vieran inundados. Esto podría ocurrir cuando los infectados fueran todavía una fracción de un 1 %. Sin embargo, la tasa de bajas sería probablemente mayor en las megaciudades del mundo en desarrollo.

Las pandemias son una amenaza natural siempre presente, pero ¿es solo alarmismo plantear la preocupación acerca de los peligros inducidos por humanos debidos a bioerrores o bioterrorismo? Lamentablemente, no creo que lo sea. Todos sabemos demasiado bien que la pericia técnica no garantiza una racionalidad equilibrada. La aldea global tendrá sus idiotas globales, y estos tendrán un alcance global. La difusión de un patógeno liberado artificialmente no puede predecirse ni controlarse; darse cuenta de ello inhibe el empleo de armas biológicas por parte de los gobiernos, o incluso por parte de grupos terroristas con objetivos específicos bien definidos (esa es la razón por la que me centré en las amenazas nuclear y cibernética en el segundo apartado del capítulo 1). Así, pues, mi peor pesadilla sería un «solitario» desequilibrado con experiencia en biotecnología, que creyera, por ejemplo, que hay demasiados humanos en el planeta y no le importara quiénes, o cuántos, se infectaran. El empoderamiento creciente de grupos (o incluso individuos) expertos en tecnología, ya sea bio o cibertecnología, supondrá un reto intratable para los gobiernos y agravará la tensión entre libertad, privacidad y seguridad. Lo más probable es que se dé un cambio social hacia más intrusión y menos privacidad. (De hecho, el imprudente desenfreno con el que la gente introduce sus detalles íntimos en Facebook, y nuestra aquiescencia a la existencia de circuitos cerrados de televisión –



videovigilancia—, sugieren que un cambio de este tipo se encontraría con, sorprendentemente, poca resistencia).

El bioerror y el bioterrorismo son posibles a muy corto plazo: en diez o quince años. Y a más largo plazo se agravarán cuando sea posible «diseñar» y sintetizar virus; el arma «definitiva» será combinar una elevada letalidad con la transmisibilidad del resfriado común.

¿Qué avances nos proporcionarán los biólogos en 2050 y más allá? Freeman Dyson predice una época en la que los niños diseñarán y crearán nuevos organismos de manera tan rutinaria como su generación jugaba con equipos de química<sup>[32]</sup>. Si un día fuera posible «jugar a ser Dios en la mesa de la cocina», nuestra ecología (e incluso nuestra propia especie) podría no sobrevivir indemne por mucho tiempo. Sin embargo, Dyson no es un biólogo; es uno de los principales físicos teóricos del siglo xx. No obstante, a diferencia de muchas de estas personas, es un pensador divergente y especulativo, que a menudo expresa una preferencia contraria. Por ejemplo, en la década de 1950 formaba parte de un grupo que exploraba el concepto especulativo «Proyecto Orión». El objetivo del grupo era conseguir viajes interestelares con naves espaciales accionadas por explosiones de bombas H (propulsión de pulso nuclear) detrás del vehículo (bien protegido). Incluso en 2018, Dyson sigue siendo escéptico acerca de la necesidad de una respuesta urgente al cambio climático.

Se está priorizando seriamente la investigación sobre el envejecimiento. ¿Serán graduales los beneficios? ¿O acaso el envejecimiento es una «enfermedad» que puede curarse? La investigación seria se centra en los telómeros, tramos de ADN en los extremos de los cromosomas, que se acortan a medida que la persona envejece. Ha sido posible lograr un aumento de diez veces en la duración de la vida de gusanos nematodos, pero el efecto en animales más complejos es menos espectacular. La única manera efectiva de extender la vida de las ratas es suministrarles una dieta cercana a la inanición. Pero existe un animal poco atractivo, la rata topo desnuda, que puede tener algunas lecciones biológicas especiales para nosotros; algunas viven más de treinta años: muchas veces más que la duración de la vida de otros mamíferos pequeños.

Cualquier descubrimiento importante en la extensión de la vida para los humanos alteraría las previsiones demográficas de una manera drástica; los efectos sociales, que obviamente serían enormes, dependerían de si los años de senilidad también se alargaran, y de si el momento de la menopausia de las mujeres se retrasase con el aumento de la duración total de la vida. Pero

varios tipos de mejora humana mediante tratamientos hormonales pueden resultar posibles a medida que se comprenda mejor el sistema endocrino humano, y es probable que entre estas mejoras haya cierto grado de extensión de la vida. Tal como ocurre con gran parte de la tecnología, las prioridades están excesivamente sesgadas hacia los ricos. Y el deseo de una duración mayor de la vida es tan poderoso que crea un mercado fácil para terapias exóticas sin eficacia probada. Ambrosia, una empresa emergente de 2016, ofrece a los ejecutivos de Silicon Valley una transfusión de «sangre joven». Otra moda reciente era la metformina, un producto farmacéutico diseñado para tratar la diabetes, pero del que se afirma que previene la demencia y el cáncer; otros elogian los beneficios de las células placentarias. Craig Venter posee una compañía llamada Human Longevity, que recibió 300 millones de dólares en fondos para empresas emergentes. Esto va más allá de lo que hace 23andMe, la empresa que analiza nuestro genoma lo bastante bien como para revelar resultados interesantes sobre nuestra vulnerabilidad frente a determinadas enfermedades, y sobre nuestro abuelo. Venter quiere analizar el genoma de los miles de especies de «bichos» en nuestro tubo digestivo. Se cree (de forma muy plausible) que este «ecosistema» interno es crucial para nuestra salud.

El «impulso» desde Silicon Valley para conseguir la «juventud eterna» surge no solo de los inmensos superávits de beneficios que allí se han acumulado, sino también porque se trata de un lugar con una cultura basada en la juventud. Allí se piensa que los que tienen más de treinta años son unos «carcamales». El futurista Ray Kurzweil habla celosamente de alcanzar una «velocidad de escape» metafórica, cuando la medicina avance tan rápidamente que la esperanza de vida aumente más de un año cada año, lo que ofrecería una inmortalidad en potencia. Kurzweil ingiere más de cien suplementos diarios, algunos rutinarios, algunos más exóticos. Pero le preocupa que no se alcance la «velocidad de escape» durante la duración «natural» de su vida. Por ello quiere que su cuerpo sea congelado hasta que se logre este nirvana.

Una vez me entrevistó un grupo de «criónicos» entusiastas (afincados en California) llamados la «sociedad para la abolición de la muerte involuntaria». Les dije que yo preferiría terminar mi vida en un camposanto inglés que en un frigorífico californiano. Se burlaron de mí como «muertista», realmente muy anticuado. Me sorprendió descubrir más tarde que tres académicos en Inglaterra (aunque me satisface decir que no de mi universidad) habían firmado para someterse a la «criónica». Dos pagaron el

paquete completo; el tercero escogió la opción de precio rebajado para contratar únicamente la congelación de la cabeza. El contrato es con una compañía llamada Alcor, de Scottsdale, Arizona. Estos colegas son lo bastante realistas para aceptar que la probabilidad de resurrección puede ser pequeña, pero señalan que sin esta inversión la probabilidad es de cero. De modo que portan un medallón que lleva instrucciones para congelarlos de inmediato cuando mueran y para sustituir su sangre con nitrógeno líquido.

Para la mayoría de nosotros, mortales, es difícil tomarse en serio esta aspiración; además, si la criónica tuviera una perspectiva real de éxito, no creo tampoco que fuera admirable. Si Alcor no quebrara y mantuviera responsablemente la refrigeración y el servicio durante los siglos necesarios, los cadáveres se revivirían en un mundo en el que serían extranjeros: refugiados del pasado. Quizá los tratarían de manera indulgente, tal como nosotros sentimos que deberíamos tratar (por ejemplo) a los angustiados que buscan asilo, o a los miembros de una tribu amazónica a quienes han desplazado de su hábitat familiar. Pero la diferencia es que los «cadáveres descongelados» estarían agobiando conscientemente a las generaciones futuras; de modo que no está claro cuánta consideración merecerían. Esto recuerda un dilema similar que quizá no siempre sea ciencia ficción, aunque se quede simplemente en eso: clonar un neandertal. Uno de los expertos (un profesor de Stanford) preguntó: «¿Lo pondríamos en un zoo o lo enviaríamos a Harvard?».

## **CIBERTECNOLOGÍA, ROBÓTICA E IA**

Las células, los virus y otras microestructuras biológicas son esencialmente «máquinas» con componentes a escala molecular: proteínas, ribosomas, etc. Debemos los espectaculares progresos en los ordenadores a la capacidad creciente y rápida de fabricar componentes electrónicos en la nanoescala, con lo que permitimos que una complejidad casi a nivel biológico se empaquete en los procesadores que hacen funcionar teléfonos inteligentes, robots y redes de ordenadores.

Gracias a estos avances transformadores, internet y sus complementos han creado la «penetración» más veloz de la nueva tecnología en la historia, y también la más completamente global. Su difusión en África y China se hizo más rápidamente de lo que afirmaron casi todas las predicciones de los «expertos». Nuestra vida se ha enriquecido por la electrónica de consumo y

los servicios basados en la red que miles de millones de personas, literalmente, se pueden permitir. Y el impacto sobre el mundo en desarrollo es emblemático de cómo la ciencia aplicada de manera óptima puede transformar regiones empobrecidas. El internet de banda ancha, que pronto conseguirá un alcance mundial mediante satélites en órbitas bajas, globos estratosféricos o drones alimentados con energía solar, estimulará todavía más la educación y la adopción de atención sanitaria moderna, métodos agrícolas y tecnología modernos; incluso los más pobres pueden por lo tanto saltar a una economía conectada y gozar de las redes sociales, aunque a muchos se les nieguen todavía los beneficios de los avances tecnológicos del siglo XIX, como el saneamiento adecuado. En África, las personas pueden emplear teléfonos inteligentes para acceder a la información del mercado, realizar pagos mediante el móvil, etc.; China tiene el sistema financiero más automatizado del mundo. Estos avances tienen un «excedente del consumidor» y generan empresas y optimismo en el mundo en desarrollo. Y estos beneficios han aumentado gracias a programas efectivos destinados a eliminar enfermedades infecciosas como la malaria. Según el Pew Research Center, el 82 % de los ciudadanos chinos y el 76 % de los indios creen que sus hijos vivirán mejor de lo que ellos viven en la actualidad.

Los indios tienen ahora una tarjeta de identidad electrónica que les hace más fácil registrarse para tener beneficios sanitarios. Esta tarjeta no necesita contraseñas. El patrón de las venas en nuestros ojos nos permite el empleo de programas de «reconocimiento del iris», una mejora sustancial con respecto a las huellas dactilares o al reconocimiento facial. Este sistema es lo bastante preciso para identificar de forma inequívoca a los individuos, entre los 1300 millones de indios. Y es un anticipo de los beneficios que pueden venir de los avances futuros en IA.

El reconocimiento de la voz, el reconocimiento facial y otras aplicaciones similares utilizan una técnica denominada aprendizaje automático generalizado. Este opera de una manera parecida a como los humanos utilizan sus ojos. La parte «visual» del cerebro humano integra la información procedente de la retina mediante un proceso de fases múltiples. Unas capas sucesivas de procesamiento identifican las líneas horizontales y verticales, los bordes agudos, etc.; cada capa procesa información procedente de una capa «inferior» y después pasa su resultado a otras capas<sup>[33]</sup>.

Los conceptos básicos de aprendizaje automático proceden de la década de 1980; un pionero importante fue el anglocanadiense Geoff Hinton. Pero las aplicaciones solo «emprendieron el vuelo», realmente dos décadas más tarde,

cuando el cumplimiento inalterable de la ley de Moore (la velocidad de los ordenadores se duplica cada dos años) condujo a máquinas con una velocidad de procesamiento mil veces más rápida. Los ordenadores emplean métodos de «fuerza bruta». Aprenden a traducir leyendo millones de páginas de (por ejemplo) documentos multilingües de la Unión Europea (¡nunca se aburren!). Aprenden a identificar caras de perros, gatos y caras humanas estudiando millones de imágenes vistas desde perspectivas diferentes.

DeepMind, una compañía londinense que ahora posee Google, ha encabezado avances apasionantes. El cofundador y director ejecutivo de DeepMind, Demis Hassabis, ha tenido una carrera precoz. A los trece años era el subcampeón del mundo de ajedrez de su categoría. Tenía los requisitos para entrar en Cambridge a los quince años, pero demoró su admisión durante dos años, tiempo en el que trabajó en juegos de ordenador, y entre otras cosas concibió Theme Park, que tuvo mucho éxito. Después de estudiar informática en Cambridge, inició una compañía de juegos de ordenador. Después volvió a la academia y obtuvo un doctorado en el University College de Londres, al que siguió un trabajo posdoctoral sobre neurociencia cognitiva. Estudió la naturaleza de la memoria episódica y cómo simular grupos de células cerebrales humanas en máquinas de redes neurales.

En 2016, DeepMind consiguió una hazaña notable: su ordenador ganó al campeón mundial del juego de Go. Puede parecer que no es nada del otro mundo, porque ya hace más de veinte años que el superordenador Deep Blue, de IBM, venció a Garri Kaspárov, el campeón mundial de ajedrez. Pero fue un cambio en las «reglas del juego», por decirlo coloquialmente, pero también en sentido literal. Deep Blue había sido programado por jugadores expertos. En cambio, la máquina AlphaGo adquirió su pericia mediante la absorción de un enorme número de juegos y también jugando. Sus diseñadores no saben cómo la máquina toma sus decisiones. Y en 2017, AlphaGo Zero fue un paso más allá; solo se le proporcionaron las reglas (no juegos reales), aprendió completamente a partir de cero y se convirtió en un jugador de clase mundial en solo un día. Esto es asombroso. El artículo científico que describe la hazaña concluía con el pensamiento de que...

[...] la humanidad ha acumulado el conocimiento del Go a partir de millones de juegos realizados a lo largo de miles de años, destilados colectivamente en patrones, proverbios y libros. En el espacio de unos pocos días, empezando desde cero, AlphaGo Zero pudo redescubrir gran parte de este conocimiento del Go, así como estrategias nuevas que proporcionan nuevas inspiraciones para el más antiguo de los juegos<sup>[34]</sup>.

Utilizando técnicas parecidas, la máquina alcanzó una competencia en ajedrez equivalente a la de Kasparov en pocas horas, sin información de expertos, y proezas similares en el juego japonés del shogi. Un ordenador de la Universidad Carnegie Mellon ha aprendido a hacer faroles y a calcular tan bien como los mejores jugadores profesionales de póker. Pero el propio Kasparov ha destacado que en juegos como el ajedrez los humanos ofrecen un «valor añadido» distintivo, y que una persona más una máquina, en combinación, pueden superar lo que cada uno de ellos podría conseguir por separado.

La IA logra su ventaja sobre los humanos mediante su capacidad para analizar enormes volúmenes de datos y de manipular rápidamente y responder a una entrada compleja. Sobresale en la optimización de redes complicadas, como la red eléctrica o la del tráfico urbano. Cuando la gestión de la energía de sus grandes granjas de datos se cedió a una máquina, Google informó de un 40 % de ahorro en energía. Pero sigue habiendo limitaciones. Los programas informáticos en que se basa AlphaGo utilizaron cientos de kilovatios de energía. En cambio, el cerebro de Lee Sedol, el contrincante coreano de AlphaGo, consume unos treinta vatios (como una bombilla) y puede hacer muchas otras cosas además de jugar a juegos de mesa.

La tecnología de sensores, el reconocimiento de voz, las búsquedas de información, etc., avanzan rápidamente. Lo mismo ocurre (aunque con una demora más sustancial) con la destreza física. Los robots son todavía más torpes que un niño cuando se trata de mover piezas en un tablero de ajedrez, atarse los cordones de los zapatos o cortar uñas. Pero también aquí hay progreso. En 2017, Boston Dynamics presentó un robot de aspecto imponente llamado Handle (un sucesor de Big Dog, anterior y de cuatro patas), con ruedas además de dos piernas, que es lo bastante ágil para realizar volteretas hacia atrás. Pero tendrá que pasar mucho tiempo antes de que las máquinas sean mejores que los gimnastas humanos –o, de hecho, de que interactúen con el mundo real con la agilidad de monos y ardillas cuando saltan de árbol en árbol– y mucho más antes de que consigan la versatilidad general de los humanos.

El aprendizaje automático, que permite el poder cada vez mayor y que bate todos los récords de los ordenadores, es un descubrimiento formidable en potencia. Permite que las máquinas obtengan experiencia (no solo en los juegos, sino también en el reconocimiento facial, la traducción entre idiomas, la gestión de redes, etc.) sin que se las programe en detalle. Pero las

implicaciones para la sociedad humana son ambivalentes. No existe un «operador» que sepa exactamente cómo la máquina alcanza una decisión. Si existe un virus en el equipo lógico de un sistema de IA, ahora mismo no siempre es posible dar con su paradero; es probable que esto cause una preocupación pública si las «decisiones» del sistema tienen consecuencias potencialmente graves para los individuos. Si se nos condena a un año de prisión, se nos recomienda que nos sometamos a cirugía o incluso si se nos da una solvencia crediticia baja, esperaríamos tener acceso a las razones que motivaron estas decisiones, y que pudiéramos discutirlos. Si tales decisiones se delegaron totalmente a un algoritmo, estaríamos autorizados a sentirnos inquietos, aunque se nos proporcionaran pruebas convincentes de que, como promedio, las máquinas toman mejores decisiones que los humanos a los que han suplantado.

La integración de estos sistemas de IA tiene un impacto sobre la vida cotidiana, que será cada vez más invasivo y general. Los registros de todos nuestros movimientos, nuestras interacciones con los demás, nuestra salud y nuestras transacciones financieras estarán en la «nube», gestionados por un monopolio cuasiinternacional. Los datos pueden usarse por razones benignas (por ejemplo, para investigación médica, o para advertirnos de riesgos de salud incipientes), pero su disponibilidad para las compañías de internet ya está cambiando el equilibrio de los gobiernos al mundo comercial. Efectivamente, los patronos pueden ahora hacer el seguimiento de obreros concretos de manera mucho más invasiva que los jefes tradicionales más autócratas o «locos por el control». Habrá otras preocupaciones en relación con la privacidad. ¿Le gustaría al lector que un extraño aleatorio, sentado cerca de él en un restaurante o en un transporte público, pudiera, mediante reconocimiento facial, identificarlo e invadir su privacidad? ¿O si «vídeos falsos» del lector resultasen tan convincentes que ya no se pudiera confiar en la evidencia visual?

## **¿Y QUÉ HAY DE NUESTROS PUESTOS DE TRABAJO?**

El patrón de nuestra vida (la manera en que accedemos a la información y al entretenimiento, y nuestras redes sociales) ya ha cambiado hasta un grado que difícilmente hubiéramos imaginado hace veinte años. Además, la IA se encuentra solo en la fase inicial en comparación con lo que sus partidarios esperan en las próximas décadas. Es evidente que habrá cambios drásticos en

la naturaleza del trabajo, que no solo nos proporciona nuestros ingresos, sino que también ayuda a dar sentido a nuestra vida y a nuestras comunidades. Así, la pregunta social y económica básica es esta: esta «nueva era de las máquinas», ¿será como las anteriores tecnologías perturbadoras (los ferrocarriles o la electrificación, por ejemplo) y creará tantos empleos como los que destruya? ¿O esta vez será realmente diferente?

Durante la última década, cayeron los salarios de las personas no cualificadas en Europa y Norteamérica. También lo hizo la seguridad del empleo de estas personas. A pesar de ello, un factor compensatorio nos ha ofrecido un mayor bienestar subjetivo a todos: el extra de consumo que ofrece el mundo digital, cada vez más extendido. Los teléfonos inteligentes y los ordenadores portátiles han mejorado de una manera enorme. Valoro el acceso a internet mucho más de lo que valoro poseer un automóvil, y es mucho más barato.

Resulta evidente que las máquinas se encargarán de gran parte del trabajo de fabricar y de distribuir al por menor. Pueden sustituir a muchos empleos administrativos: trabajo legal rutinario (como transmisión de la propiedad), contabilidad, programación informática, diagnósticos médicos e incluso cirugía. Muchos «profesionales» encontrarán que sus destrezas, obtenidas duramente, tendrán menos demanda. En cambio, algunos empleos cualificados del sector servicios (fontanería y jardinería, por ejemplo) requieren interacciones no rutinarias con el mundo externo y por lo tanto serán los empleos más difíciles de automatizar. Para fijarnos en un ejemplo muy citado, ¿cuán vulnerables son los puestos de trabajo de los tres millones de camioneros en los Estados Unidos?

Los vehículos autónomos<sup>[35]</sup> pueden aceptarse rápidamente en áreas limitadas en las que tendrán las carreteras a su disposición, en partes delimitadas del centro de las ciudades o quizá en carriles o carreteras especiales. Y existe un potencial para el uso de máquinas autónomas en tareas agrícolas y de cosecha, que operan fuera de las carreteras. Pero lo que no está tan claro es si los vehículos autónomos serán capaces de funcionar con seguridad cuando se enfrenten a toda la complejidad de la conducción rutinaria: recorrer carreteras estrechas y serpenteantes y compartir calles urbanas con vehículos conducidos por humanos, bicicletas y peatones. Pienso que esto topará con una resistencia pública.

¿Acaso un coche totalmente autónomo será más seguro que un coche con un conductor humano? Si un objeto obstruye la carretera ante el coche, ¿podrá este distinguir la diferencia entre una bolsa de papel, un perro o un



niño? Lo que se asegura es que no podrá hacerlo de manera infalible, pero que lo hará mejor que el conductor humano promedio. ¿Es eso cierto? Algunos dirían que sí. Si los coches están conectados entre sí de forma inalámbrica, aprenderían más rápidamente al compartir experiencias.

Por otra parte, no hemos de olvidar que cualquier innovación es inicialmente arriesgada; piénsese en los primeros días de los ferrocarriles, o del uso pionero de operaciones quirúrgicas que ahora son rutinarias. En lo que respecta a la seguridad en carretera, he aquí algunas cifras del Reino Unido. En 1930, cuando solo había un millón de vehículos en las carreteras, hubo más de 7000 incidentes fatales; en 2017 hubo unas 1700 muertes, una reducción por un factor de cuatro, aunque hay unas treinta veces más vehículos en las carreteras de los que había en 1930<sup>[36]</sup>. La tendencia se debe en parte a mejores carreteras, pero en gran medida a coches más seguros y, en los últimos años, a sistemas de navegación basados en satélites (GPS) y otros artilugios electrónicos. Esta tendencia continuará, lo que hará que conducir sea más seguro y más fácil. Pero unos vehículos totalmente automáticos que compartan carreteras ordinarias con tráfico mixto supondrán un cambio realmente disyuntivo. Está justificado que seamos escépticos acerca de lo factible y aceptable que será esta transición.

Puede pasar mucho tiempo antes de que los conductores de camiones y de automóviles sean prescindibles. Se puede considerar lo que está pasando en la aviación civil como una situación paralela. Aunque viajar en avión fue antaño peligroso, ahora es asombrosamente seguro. Durante 2017 no hubo una sola muerte, en todo el mundo, en ningún avión de pasajeros con itinerario de vuelo. La mayor parte del vuelo se hace en piloto automático; un piloto real solo se necesita en las emergencias. Pero lo preocupante es que el o la piloto no esté alerta en el momento crucial. El avión de Air France que se estrelló en el Atlántico sur en 2009, en ruta desde Río de Janeiro, Brasil, hacia París, demuestra lo que puede ir mal: los pilotos tardaron demasiado en volver a tomar el control cuando hubo una emergencia, se equivocaron y agravaron el problema. Por otra parte, pilotos suicidas han causado realmente colisiones devastadoras que el piloto automático no pudo evitar. ¿Se sentirá el público relajado al subir a un avión sin piloto? Lo dudo. Pero aviones sin piloto pueden ser aceptables para el transporte de carga. Los pequeños drones de entrega tienen un futuro prometedor; de hecho, en Singapur existen planes para sustituir los vehículos de reparto a nivel del suelo por drones que vuelen sobre las calles. Pero incluso para estos, somos demasiado condescendientes acerca del riesgo de colisiones, especialmente si proliferan. Para los coches

ordinarios, no pueden descartarse los errores de los programas informáticos ni los ciberataques. Ya vemos que los programas informáticos y los sistemas de seguridad que hay en los automóviles, cada vez más sofisticados, pueden piratearse. ¿Podemos proteger con seguridad los frenos y la dirección contra el pirateo informático?

Un beneficio de los automóviles autónomos que se cita con frecuencia es que en lugar de comprarlos se alquilarán y se compartirán. Esto puede reducir la cantidad de espacio de aparcamiento que se necesite en las ciudades, lo que desdibujará la línea entre transporte público y transporte privado. Pero lo que no es evidente es hasta qué punto esto será así: si el deseo de poseer nuestro propio automóvil desaparecerá de hecho. Si los coches autónomos cuajan, promoverán los viajes por carretera a costa de los viajes en ferrocarril tradicionales. En Europa son muchas las personas que prefieren tomar el tren para un viaje de 300 kilómetros; es menos estresante que conducir y proporciona tiempo para trabajar o leer. Pero si tuviéramos un «chófer electrónico» en el que se pudiera confiar durante todo el viaje, muchos de nosotros preferiríamos viajar en coche y obtener un servicio de puerta a puerta. Esto reduciría la demanda para las rutas en ferrocarril a larga distancia, pero al mismo tiempo proporcionaría un incentivo para inventar nuevas formas de transporte como los interurbanos mediante tubos al vacío<sup>[37]</sup>. Lo mejor de todo, desde luego, serían las telecomunicaciones de alta calidad que obviarían la necesidad de la mayoría de los viajes que no fueran de ocio.

La revolución digital genera una enorme riqueza para un grupo de élite de innovadores y para compañías mundiales, pero para conservar una sociedad saludable será necesario redistribuir dicha riqueza. Se habla de utilizarla para proporcionar un salario universal. Los obstáculos para poner en marcha dicho salario son bien conocidos, y las desventajas sociales son intimidantes. Sería mucho mejor subvencionar los tipos de empleos para los que en la actualidad hay una demanda en gran parte no cubierta y para los que la paga y el nivel social son injustamente bajos.

Es instructivo observar (a veces con perplejidad) en qué eligen gastar su dinero los que no están limitados desde el punto de vista financiero. Las personas ricas valoran el servicio personal; emplean a entrenadores personales, niñeras y mayordomos. Cuando son ancianos, contratan a cuidadores humanos. El criterio para un gobierno progresista debería ser proporcionar a todas las personas el tipo de ayuda que prefieren las personas pudientes: las que tienen ahora la elección más libre. Para crear una sociedad

humanitaria, los gobiernos necesitarán mejorar enormemente el número y el nivel social de las personas que se dedican a cuidar a otras personas; en la actualidad son demasiado pocas, e incluso en los países ricos a los cuidadores se les paga mal y sus puestos de trabajo son inseguros. (Es cierto que los robots pueden ocuparse de algunos aspectos de los cuidados rutinarios; de hecho, podemos encontrar menos embarazoso que la limpieza y la alimentación básicas y las rutinas relacionadas con las bacinillas las realice un autómatas. Pero los que se lo pueden permitir también quieren la atención de seres humanos reales). Y existen otros empleos que harían nuestra vida mejor y podrían proporcionar empleo valioso para muchas más personas, por ejemplo, jardineros en parques públicos, conserjes, etc.

No son solo los muy jóvenes y los muy ancianos los que necesitan ayuda humana. Cuando tantos asuntos, entre ellos la interacción con el gobierno, se hacen a través de internet, deberíamos preocuparnos, por ejemplo, por una persona discapacitada que viva sola y que necesite acceder a páginas webs en línea para reclamar las prestaciones gubernamentales a las que tiene derecho, o para pedir provisiones básicas. Piense el lector en la ansiedad y la frustración cuando algo no funciona. Estas personas solo tendrán tranquilidad de espíritu si hay cuidadores con conocimientos informáticos para ayudar a los desconcertados a que se manejen con las tecnologías de la información, para asegurarse de que puedan obtener ayuda y que no se hallen en desventaja. De no ser así, los «digitalmente desfavorecidos» se convertirán en una nueva «clase marginal».

Es mejor que todos podamos realizar trabajo socialmente útil que recibir una limosna. Sin embargo, la típica semana laboral podría acortarse, más incluso que las treinta y cinco horas que ahora dura en Francia. Aquellos a los que el trabajo les satisface intrínsecamente son atípicos y especialmente afortunados. La mayoría de las personas recibirían con satisfacción una reducción del horario laboral, lo que permitiría disponer de más tiempo para el entretenimiento, relacionarse con la gente y participar en rituales colectivos, ya sean religiosos, culturales o deportivos.

También habrá un resurgimiento de las artes y oficios. Hemos asistido a la aparición de chefs que son celebridades, incluso de peluqueros célebres. Veremos que se prestará más atención a otros oficios y que se concederá más respeto a sus exponentes con más talento. De nuevo, los ricos, los que tienen más libertad de elección, gastan mucho en patrocinar actividades que requieren un trabajo intensivo.

La erosión del trabajo rutinario y de las carreras que duran toda la vida estimulará el «aprendizaje continuo». La educación formal, basada en la enseñanza que se hace en las aulas y salas de conferencias, es quizá el sector más esclerótico de las sociedades en todo el mundo. El aprendizaje a distancia mediante cursos en línea quizá no reemplace nunca a la experiencia de asistir a la sede de una facultad que ofrece tutelaje y orientación, pero se convertirá en una sustitución rentable y más flexible de la típica «universidad masificada». Existe un potencial ilimitado para el modelo del que fue pionera la Open University del Reino Unido, un modelo que ahora se está extendiendo ampliamente a través de organizaciones estadounidenses como Coursera y edX<sup>[38]</sup>, en las que académicos de primera línea proporcionan el contenido de cursos en línea. Los profesores que mejor enseñan pueden convertirse en estrellas mundiales en línea. Dichos cursos mejorarán debido a la personalización que la IA podrá proporcionar de manera creciente. Aquellas personas que se convierten en científicos suelen atribuir su motivación inicial a la red o a los medios de comunicación más que a la instrucción recibida en clase.

El estilo de vida que ofrece un mundo más automatizado parece benigno, y de hecho seductor, y en principio podría promover la satisfacción que sienten los escandinavos por toda Europa y Norteamérica. Sin embargo, los ciudadanos de estas naciones privilegiadas están cada vez menos aislados de las partes desfavorecidas del mundo. A menos que se reduzca la desigualdad entre países, el resentimiento y la inestabilidad se agudizarán debido a que los pobres, en todo el mundo, a través de las tecnologías de la información y los medios de comunicación, son ahora mucho más conscientes de lo que se pierden. Los avances técnicos podrían amplificar la perturbación internacional. Además, si la robótica hace económicamente viable que los países ricos concentren la fabricación de artículos dentro de sus propias fronteras, el impulso de desarrollo, efímero pero crucial, que recibieron los «tigres» de Extremo Oriente al vender el producto de su trabajo a precios más bajos que en Occidente, les estará negado a las naciones todavía pobres de África y Oriente Medio, lo que hará que las desigualdades sean más persistentes.

Asimismo, la naturaleza de la migración ha cambiado. Hace cien años, la decisión de un individuo europeo o asiático de desplazarse a Norteamérica o Australia requería cortar los lazos con su cultura indígena y su extensa familia. Por lo tanto, existía un incentivo para integrarse en la nueva sociedad. En cambio, en la actualidad las videollamadas cotidianas y los contactos a

través de los medios sociales permiten a los inmigrantes, si así lo quieren, permanecer integrados en la cultura de su patria, y los viajes intercontinentales asequibles ayudan a mantener los contactos personales.

Las lealtades y divisiones nacionales y religiosas persistirán (o incluso se reforzarán por las cajas de resonancia de internet) a pesar de que haya una mayor movilidad y un menor sentimentalismo hacia el «lugar». Los nómadas del mundo tecnócrata aumentarán en número. Los empobrecidos considerarán que su mejor esperanza es «seguir el dinero»: migrarán legal o ilegalmente. Las tensiones internacionales se agudizarán.

Si existe realmente un riesgo creciente de conflictos generados por la ideología o por la desigualdad percibida como injusta, se agravará por el impacto de la nueva tecnología en la guerra y el terrorismo. Al menos durante la última década, hemos visto noticias por televisión de drones o cohetes que atacaban objetivos en Oriente Medio. Están controlados desde búnkeres en los Estados Unidos continentales, por parte de individuos más alejados incluso de las consecuencias de sus acciones que las tripulaciones de aviones que realizan incursiones de bombardeo. La incomodidad ética que esto produce resulta parcialmente apaciguada por afirmaciones de que una mayor precisión en los objetivos reduce los daños colaterales. Pero al menos hay un humano «al tanto» que decide cuándo y qué atacar. En cambio, ahora existe la posibilidad de armas autónomas, que pueden buscar un objetivo utilizando el reconocimiento facial para identificar individuos y después matarlos. Esto sería un precursor de la guerra automatizada, una posibilidad que plantea una gran preocupación. Las posibilidades que ya están ahí incluyen ametralladoras automáticas, drones y vehículos acorazados o submarinos que pueden identificar objetivos, decidir si abren fuego y aprender sobre la marcha.

Hay una preocupación creciente acerca de los «robots asesinos». En agosto de 2017, los dirigentes de un centenar de compañías importantes del sector firmaron una carta abierta que pedía a las Naciones Unidas que prohibiera por ley las «armas letales autónomas», de la misma manera que existen convenios internacionales que restringen el uso de armas químicas y biológicas<sup>[39]</sup>. Los firmantes advierten de un campo de batalla electrónico «a una escala mayor que nunca, y con escalas de tiempo más rápidas de lo que los humanos pueden comprender». No está claro cuán efectivo podría ser un tratado de este tipo; al igual que en el caso de las armas biológicas, las naciones pueden continuar con estas tecnologías por supuestos motivos

«defensivos» y por miedo a que naciones sin escrúpulos o grupos extremistas sigan adelante, de todos modos, con este tipo de investigaciones.

Estas son preocupaciones a corto plazo, para las que ya se conocen las tecnologías clave. Pero miremos ahora más allá.

## **¿INTELIGENCIA DE NIVEL HUMANO?**

Las situaciones hipotéticas que se han comentado en la última sección se hallan en un futuro lo bastante cercano como para que necesitemos planificarlas y ajustarnos a ellas. Pero ¿qué pasa con las perspectivas a un plazo más largo? Estas son más opacas, y no existe un consenso entre los expertos sobre la velocidad del progreso en la inteligencia de las máquinas, ni, en realidad, sobre cuáles podrían ser los límites de la IA. Parece plausible que una IA conectada a internet podría «hacer su agosto» en el mercado de valores al analizar muchos más datos muchísimo más deprisa que cualquier humano. En cierta medida, esto es lo que ya están haciendo los fondos de cobertura cuantitativos. Pero para las interacciones con los humanos, o incluso con el ambiente complejo y rápidamente cambiante que un automóvil autónomo encuentra en una carretera ordinaria, la potencia de procesamiento no es suficiente; los ordenadores necesitarán sensores que les permitan ver y oír tan bien como lo hacen los humanos, y un equipo lógico para procesar e interpretar lo que los sensores transmiten.

Pero ni siquiera esto sería suficiente. Los ordenadores aprenden a partir de un «conjunto de adiestramiento» de actividades similares, en el que el éxito es «premiado» inmediatamente y reforzado. Los ordenadores que ejecutan juegos de ordenador los realizan por millones; los ordenadores que efectúan fotointerpretación obtienen precisión al estudiar millones de imágenes; para que los coches autónomos obtuvieran esta destreza tendrían que comunicarse unos con otros, compartir y actualizar sus conocimientos. Pero aprender acerca del comportamiento humano implica observar a personas reales en hogares o lugares de trabajo reales. La máquina se sentiría limitada sensorialmente por la lentitud de la vida real y se desconcertaría. Para citar a Stuart Russell, uno de los principales teóricos de la IA:

La máquina podría intentar todo tipo de cosas: batir huevos, apilar bloques de madera, mordisquear cables, introducir su dedo en enchufes eléctricos. Pero nada produciría un bucle de retroalimentación lo

bastante fuerte para convencer al ordenador de que se hallaba en la dirección correcta ni lo conduciría a la siguiente acción necesaria<sup>[40]</sup>.

Solo cuando se pueda superar esta barrera se podrá percibir verdaderamente a las IA como seres inteligentes, con las que (o con los que) podamos relacionarnos, al menos en algunos aspectos, como hacemos con otras personas. Y sus «pensamientos» y reacciones más rápidas les podrían conferir entonces una ventaja sobre nosotros.

Algunos científicos temen que los ordenadores puedan desarrollar «una mente propia» y perseguir con objetivos hostiles a la humanidad. ¿Acaso una potente IA futurista permanecerá dócil, o «se volverá depravada»? ¿Entenderá los propósitos y motivos humanos y estará de acuerdo con ellos? ¿Acaso aprenderá suficiente ética y sentido común como para «saber» cuándo estos tienen que anteponerse a sus otros motivos? Si puede infiltrarse en el internet de las cosas, podrá manipular el resto del mundo. Sus objetivos podrán ser contrarios a los deseos humanos, o incluso podrán tratar a los humanos como estorbos. La IA puede tener un «objetivo», pero lo que realmente es difícil de instilar es «sentido común». La IA no debería perseguir obsesivamente su objetivo y tendría que estar preparada para abandonar sus esfuerzos en lugar de violar normas éticas.

Los ordenadores mejorarán enormemente las habilidades matemáticas, y quizá incluso la creatividad. Ya en la actualidad nuestros teléfonos inteligentes nos liberan de tener que recordar cuestiones rutinarias y nos proporcionan acceso casi inmediato a la información del mundo. Pronto la traducción entre idiomas será rutinaria. El paso siguiente podría ser «conectar» memoria adicional o adquirir habilidades idiomáticas mediante la entrada directa al cerebro, aunque no está claro hasta qué punto esto puede ser viable. Si podemos aumentar nuestro cerebro con implantes electrónicos, podríamos ser capaces de descargar nuestros pensamientos y recuerdos en una máquina. Si las tendencias actuales continúan sin trabas, entonces algunas de las personas que viven en la actualidad podrían alcanzar la inmortalidad... al menos en el sentido limitado de que sus pensamientos y recuerdos descargados podrían tener una duración no limitada a la de su cuerpo actual. Los que busquen este tipo de vida eterna lograrán, empleando la antigua jerga de los espiritistas, «pasar al otro lado».

Entonces nos enfrentamos al clásico problema filosófico de la identidad personal. Si nuestro cerebro se descargase en una máquina, ¿en qué sentido esta seguiría siendo «nosotros»? ¿Deberíamos sentirnos relajados si nuestro

cuerpo se destruyera después? ¿Qué ocurriría si se hicieran varios clones de nosotros? ¿Y la entrada a nuestros órganos de los sentidos, y las interacciones con el mundo externo real, son tan esenciales para nuestro ser que esta transición sería no solo abominable, sino también imposible? Estos son antiguos enigmas para los filósofos, pero quizá los moralistas prácticos necesiten abordarlos pronto porque pueden ser relevantes para las elecciones que los humanos reales harán durante este siglo.

Con relación a todas estas especulaciones para después de 2050, no sabemos dónde se halla la frontera entre lo que puede ocurrir y lo que seguirá siendo ciencia ficción, de la misma manera que no sabemos si tomarnos en serio la visión de Freeman Dyson del biopiratero por parte de niños. Se trata de visiones ampliamente divergentes. Algunos expertos, por ejemplo, Stuart Russell en Berkeley y Demis Hassabis de DeepMind, piensan que el campo de la IA, como la biotecnología sintética, ya necesita directrices para una «innovación responsable». Además, el hecho de que AlphaGo alcanzara un objetivo que sus creadores pensaban que habría requerido varios años más ha hecho que el equipo de DeepMind sea más optimista todavía acerca de la velocidad del progreso. Pero otros, como el experto en robótica Rodney Brooks (creador del robot Baxter y del aspirador Roomba), piensan que estos problemas están tan lejos de realizarse que no vale la pena preocuparse por ellos: siguen estando menos inquietos por la inteligencia artificial que por la estupidez real. Compañías como Google, que trabajan en estrecho contacto con la academia y el gobierno, lideran la investigación en IA. Estos sectores hablan ahora con una sola voz a la hora de destacar la necesidad de promocionar una IA «sólida y beneficiosa», pero pueden surgir tensiones cuando la IA pase de la fase de investigación y desarrollo a ser una enorme mina de oro en potencia para compañías globales.

Pero ¿acaso es importante que los sistemas de IA tengan pensamientos conscientes en el sentido que los tienen los humanos? En opinión del pionero de la ciencia informática Edsger Dijkstra, se trata de una no pregunta: «Que las máquinas puedan pensar es casi tan relevante como la pregunta de si los submarinos pueden nadar». Tanto una ballena como un submarino se desplazan por el agua, pero lo hacen de maneras que son fundamentalmente diferentes. Pero para muchos la cuestión de si las máquinas inteligentes son conscientes es algo que importa muchísimo. En una situación hipotética (véase el quinto apartado del capítulo 3) en la que la evolución futura esté dominada por entidades que sean electrónicas, en lugar de tener el equipo «húmedo» que nosotros tenemos en nuestro cráneo, parecería deprimente que



nos sobrepasaran en competencia unos «zombis» que no pudieran apreciar las maravillas del universo en el que se encuentran y que no pudieran «sentir» el mundo exterior tal como pueden hacerlo los humanos. Sea como fuere, los robots autónomos transformarán la sociedad, aunque todavía está por decidir si poseerán lo que podemos llamar comprensión real o si serán «idiotas sabios»: con competencia, pero sin comprensión.

Un robot superinteligente lo bastante versátil podría ser el último invento que los humanos necesitaran hacer. Una vez que las máquinas superen la inteligencia humana, podrían diseñar y montar una nueva generación de máquinas todavía más inteligentes. Las nuevas máquinas podrían utilizar algunos de los temas «esenciales» de la ciencia especulativa que desconciertan en la actualidad a los físicos (el viaje en el tiempo, la deformación del espacio y lo ultracomplejo), lo que transformaría físicamente el mundo. Ray Kurzweil (que se mencionaba en el primer apartado del capítulo 2 en relación con la criónica) aduce que esto podría conducir a una explosión desenfrenada de inteligencia: la «singularidad»<sup>[41]</sup>.

Pocas personas dudan de que algún día las máquinas superarán las capacidades humanas más distintivas; las discrepancias se refieren al ritmo del viaje, no a su dirección. Si los entusiastas de la IA están en lo cierto, puede que los humanos de carne y hueso se vean superados en unas pocas décadas... o que tengan que pasar siglos. No obstante, en comparación con los eones de tiempo evolutivo que condujeron a la aparición de la humanidad, incluso esto supone un simple parpadeo. No se trata de una proyección fatalista. Es motivo de optimismo. La civilización que nos suplante podrá lograr progresos inimaginables; hazañas, quizá, que ni siquiera podamos comprender. Examinaré los horizontes más allá de la Tierra en el capítulo 3.

## **¿RIESGOS VERDADERAMENTE EXISTENCIALES?**

Nuestro mundo depende cada vez más de redes complejas: redes de energía eléctrica, control de tráfico aéreo, finanzas internacionales, fabricación dispersa por el mundo, etc. A menos que dichas redes sean muy resilientes, sus beneficios podrían verse superados por colapsos catastróficos (aunque raros), análogos en el mundo real a lo que ocurrió en la crisis financiera global de 2008. Las ciudades quedarían paralizadas sin electricidad: las luces se apagarían, pero no sería ni mucho menos la consecuencia más grave. En unos pocos días nuestras ciudades serían inhabitables y anárquicas. El

transporte aéreo puede distribuir una pandemia a todo el mundo en cuestión de días, lo que causaría estragos en las ciudades desorganizadas del mundo en desarrollo. Y los medios sociales pueden difundir el pánico y los rumores, y el contagio económico, literalmente a la velocidad de la luz.

Cuando nos damos cuenta del poder de la biotecnología, la robótica, la cibertecnología y la IA (y, todavía más, su potencial en las décadas venideras), no podemos evitar inquietudes acerca de cómo este empoderamiento podría usarse mal. El registro histórico revela episodios en los que se han desmoronado «civilizaciones» e incluso se han extinguido. Nuestro mundo está tan interconectado que es improbable que una catástrofe pudiera afectar a una región cualquiera sin que sus consecuencias se sucedieran en cascada por todo el mundo. Por primera vez, necesitamos considerar un colapso (social o ecológico) que sería un revés verdaderamente global para la civilización. El revés podría ser temporal. Por otra parte, podría ser tan devastador (y podría haber acarreado tanta degradación ambiental o genética) que los supervivientes no fueran capaces de regenerar nunca una civilización al nivel actual.

Pero esto plantea la pregunta siguiente: ¿podría haber una clase separada de acontecimientos extremos que serían «telones» para nosotros, catástrofes que podrían apagar toda la humanidad, o incluso toda la vida? Los físicos que trabajaban en el Proyecto Manhattan durante la segunda guerra mundial plantearon este tipo de preocupaciones prometeicas. ¿Podríamos estar completamente seguros de que una explosión nuclear no encendería toda la atmósfera del mundo, o los océanos? Antes de la prueba Trinity de 1945 de la primera bomba atómica en Nuevo México, Edward Teller y dos colegas plantearon esta cuestión en un cálculo que se publicó (mucho más tarde) por el Laboratorio de Los Álamos; se convencieron de que existía un amplio factor de seguridad. Y, por suerte, tenían razón. Ahora sabemos que una única arma nuclear, por muy devastadora que fuera, no podría desencadenar una reacción nuclear en cadena que destruyera totalmente la Tierra o su atmósfera.

Pero ¿qué sucede con experimentos incluso más extremos? Los físicos pretenden entender las partículas que constituyen el mundo y las fuerzas que rigen estas partículas. Están impacientes por probar las energías, presiones y temperaturas más extremas; a tal fin, construyen máquinas complejas y enormes: los aceleradores de partículas. La manera óptima de producir una intensa concentración de energía es acelerar átomos a velocidades enormes, cerca de la velocidad de la luz, y hacerlos chocar entre sí. Cuando dos átomos

entrechocan, sus protones y neutrones constituyentes implosionan hasta una densidad y presión mucho mayores que cuando estaban empaquetados en un núcleo normal, y liberan sus quarks constituyentes. Entonces pueden descomponerse en partículas de menor tamaño todavía. Las condiciones replican, en microcosmos, las que existían en el primer nanosegundo después del Big Bang.

Algunos físicos plantearon la posibilidad de que estos experimentos pudieran hacer algo muchísimo peor: destruir la Tierra, o incluso todo el universo. Quizá pudiera formarse un agujero negro que después absorbiera todo lo que estuviera a su alrededor. Según la teoría de la relatividad de Einstein, la energía necesaria para producir incluso el más pequeño de los agujeros negros superaría con mucho lo que estas colisiones podrían generar. Sin embargo, algunas teorías nuevas invocan dimensiones espaciales adicionales a las tres usuales; una consecuencia sería reforzar el agarre de la gravedad, lo que haría menos difícil que un objeto pequeño implosionara en un agujero negro.

La segunda posibilidad alarmante es que los quarks se reensamblaran en objetos comprimidos denominados strangelets. Esto, por sí mismo, sería inocuo. Sin embargo, según algunas hipótesis, un strangelet podría, por contagio, convertir cualquier cosa que encontrara en una nueva forma de materia, y transformar toda la Tierra en una esfera hiperdensa de alrededor de cien metros de diámetro.

El tercer peligro de estos experimentos de colisión es todavía más exótico y potencialmente el más desastroso de todos: una catástrofe que se traga el propio espacio. El espacio vacío, lo que los físicos denominan «el vacío», es más que solo nada. Es el escenario de todo lo que ocurre; tiene, latente en él, todas las fuerzas y partículas que rigen el mundo físico. Es el repositorio de la energía oscura que controla el destino del universo. El espacio podría existir en diferentes «fases», como el agua existe en tres formas: hielo, agua líquida o vapor de agua. Además, el vacío actual podría ser frágil e inestable. Aquí la analogía es con agua que es «sobreenfriada». El agua puede enfriarse por debajo de su punto de congelación normal si es pura y está quieta; sin embargo, basta una pequeña perturbación localizada (por ejemplo, una mota de polvo que caiga en ella) para desencadenar la conversión del agua sobreenfriada en hielo. Asimismo, hay quien ha especulado que la energía concentrada que se crea cuando las partículas chocan entre sí podría desencadenar una «transición de fase» que desgarraría

el tejido del espacio. Esto sería una calamidad cósmica, no únicamente terrestre.

Las teorías más aceptadas son tranquilizadoras; implican que los riesgos del tipo de experimentos que se hallan dentro de nuestras capacidades actuales son cero. Sin embargo, los físicos pueden imaginar teorías alternativas (y escribir ecuaciones para ellas) que son consistentes con todo lo que sabemos, que por lo tanto no pueden descartarse absolutamente y que permitirían que sucediera una u otra de dichas catástrofes. Quizá estas teorías alternativas no sean las favoritas, pero ¿acaso son tan increíbles que no tengamos que preocuparnos?

A los físicos se les presionó (en mi opinión, de manera totalmente correcta) para que abordaran estos «riesgos existenciales» especulativos cuando se conectaron los potentes nuevos aceleradores en el Laboratorio Nacional de Brookhaven y en el CERN, en Ginebra, que generaron concentraciones de energía sin precedentes. Afortunadamente, se pudieron dar ciertas seguridades; de hecho, yo fui uno de los que indicaron que los «rayos cósmicos» (partículas de energía muy superiores a las que pueden conseguirse en los aceleradores) colisionan con frecuencia en la galaxia, pero no han hecho pedazos el espacio<sup>[42]</sup>. Y han penetrado en estrellas muy densas sin desencadenar su conversión en estrangelets.

Así pues, ¿cuán opuestos al riesgo hemos de ser? Algunos dirían que una probabilidad de un desastre existencial de una entre diez millones sería suficiente, porque esta probabilidad está por debajo de la de que, el próximo año, un asteroide lo bastante grande para causar una devastación global choque con la Tierra. (Esto equivale a decir que el efecto carcinogénico adicional de la radiación artificial es aceptable si no hace más que doblar el riesgo de la radiación natural: el radón en las rocas locales, por ejemplo). Pero para algunos, este límite puede no parecer lo bastante estricto. Si existiera una amenaza para toda la Tierra, la sociedad podría exigir adecuadamente la seguridad de que la probabilidad fuera de menos de una entre mil millones (incluso de una entre un billón) antes de sancionar un experimento de este tipo, si su propósito fuera simplemente aplacar la curiosidad de los físicos teóricos.

¿Podemos ofrecer esta seguridad de manera creíble? Podemos ofrecer estas probabilidades contra el hecho de que el Sol no aparezca mañana, o contra el hecho de que el lanzamiento de un dado bueno produzca cien seises seguidos, porque estamos seguros de que comprendemos estas cosas. Pero si nuestra comprensión es precaria (como ocurre claramente en las fronteras de

la física), no podemos asignar realmente una probabilidad, ni afirmar con seguridad que algo es improbable. Es presuntuoso confiar en cualquier teoría sobre lo que ocurre cuando se hacen entrec chocar átomos con una energía sin precedentes. Si un comité del Congreso me preguntara: «¿Está usted diciendo realmente que hay menos de una probabilidad entre mil millones de que esté equivocado?», me sentiría incómodo contestando que sí.

Pero, en cambio, si un congresista me preguntara: «¿Podría un experimento de este tipo revelar un descubrimiento transformador que, por ejemplo, proporcionara una nueva fuente de energía para el mundo?», yo ofrecería de nuevo probabilidades en contra. La cuestión, entonces, es la probabilidad relativa de estos dos acontecimientos improbables: uno enormemente beneficioso, catastrófico el otro. Yo barruntaría que el aspecto «positivo» (un beneficio para la humanidad), aunque muy improbable, lo sería mucho menos que la situación hipotética de la «catástrofe universal». Tales pensamientos eliminarían cualquier escrúpulo sobre seguir adelante, pero es imposible cuantificar las probabilidades relativas. Así, podría ser difícil plantear una cuestión convincente y tranquilizadora para este acuerdo fáustico. La innovación suele ser arriesgada, pero si no nos arriesgamos podemos renunciar a los beneficios. La aplicación del «principio de precaución» no tiene coste de oportunidad, «el coste oculto de decir no».

No obstante, los físicos deberían ser cautelosos a la hora de realizar experimentos que generan condiciones sin precedentes, incluso en el cosmos. De la misma manera, los biólogos deberían evitar la creación de patógenos modificados genéticamente que fueran potencialmente devastadores, o modificaciones a gran escala de la línea germinal humana. Los ciberexpertos son conscientes del riesgo de una avería en cascada en las infraestructuras mundiales. Los innovadores que promueven los usos beneficiosos de la IA avanzada deberían evitar situaciones en las que una máquina «toma el poder». Muchos de nosotros nos inclinamos a descartar estos riesgos como ciencia ficción, pero teniendo en cuenta lo que nos jugamos en ellos no deberían despreciarse, incluso si se consideran muy improbables.

Estos ejemplos de riesgos casi existenciales también representan la necesidad de la destreza interdisciplinar, y de la interacción adecuada entre los expertos y la sociedad. Además, asegurar que se hace un uso óptimo de las nuevas tecnologías requerirá que las comunidades piensen globalmente y en un contexto a más largo plazo. Estas cuestiones éticas y políticas se discuten más ampliamente en el capítulo 5.

Y, por cierto, la prioridad que debemos otorgar a evitar desastres verdaderamente existenciales depende de una cuestión ética que ha discutido el filósofo Derek Parfit: los derechos de los que todavía no han nacido. Considere el lector dos situaciones hipotéticas: la situación *A* elimina el 90 % de la humanidad; la situación *B* elimina el 100 %. ¿Cuánto peor es *B* que *A*? Hay quien diría que el 10 % peor: la lista de bajas es un 10 % mayor. Pero Parfit aduciría que *B* podría ser incomparablemente peor, porque la extinción humana excluye la existencia de miles de millones, incluso de billones, de humanos futuros; y, de hecho, un futuro poshumano abierto, que podría extenderse mucho más allá de la Tierra<sup>[43]</sup>. Algunos filósofos critican el argumento de Parfit, y niegan que deba concederse a los «humanos posibles» el mismo peso que a los actuales («Queremos hacer felices a más personas, no hacer más personas felices»). E incluso si nos tomamos seriamente estos argumentos ingenuos y utilitarios, debe señalarse que si existieran extraterrestres (véase el quinto apartado del capítulo 3), la expansión terrestre, al restringir sus hábitats, ¡podría hacer una contribución neta negativa a la «alegría cósmica» total!

Sin embargo, dejando aparte estos juegos intelectuales acerca de «personas posibles», la perspectiva de un final al relato humano entristecería a los que vivimos ahora. La mayoría de nosotros, conscientes del legado que nos han dejado las generaciones pasadas, nos sentiríamos deprimidos si creyéramos que no habría muchas generaciones futuras.

(Esta es una megaversión de las cuestiones que surgen en la política sobre el clima, que se comentaron en el quinto apartado del capítulo 1, donde es discutible cuánto peso debemos dar a los que todavía no han nacido y que vivirán dentro de un siglo. También influye sobre nuestra actitud acerca del crecimiento demográfico).

Incluso si apostamos en contra de un experimento en un acelerador o de un desastre genético que destruya la humanidad, creo que vale la pena considerar estas situaciones hipotéticas como «experimentos mentales». No tenemos razones para suponer que puedan descartarse amenazas inducidas por humanos mucho peores que las que ya existen en nuestro registro de riesgos actuales. De hecho, tenemos cero razones para confiar en que podríamos sobrevivir a lo peor que puedan producir tecnologías futuras. Una máxima importante es que «lo extraño no es lo mismo que lo improbable»<sup>[44]</sup>.

Estas cuestiones éticas quedan lejos de lo «cotidiano», pero no es prematuro plantearlas; es bueno que algunos filósofos lo estén haciendo. Pero también suponen un reto para los científicos. Efectivamente, sugieren una

razón adicional para abordar cuestiones sobre el mundo físico que pueden parecer arcanas y remotas: la estabilidad del propio espacio, la aparición de la vida y la extensión y naturaleza de lo que podríamos denominar «realidad física».

Tales pensamientos nos conducen de un foco terrestre a una perspectiva más cósmica, que será el tema del capítulo siguiente. A pesar del «encanto» de los vuelos espaciales, el espacio es un ambiente hostil al que los humanos están mal adaptados. De modo que es aquí donde los robots, facultados por IA a nivel humano, tendrán el mayor de los alcances, y donde los humanos pueden usar bio y cibertécnicas para evolucionar más.

# 3

## LA HUMANIDAD EN UNA PERSPECTIVA CÓSMICA

### LA TIERRA EN UN CONTEXTO CÓSMICO

En 1968 Bill Anders, astronauta del Apolo 8, fotografió la «salida de la Tierra», que mostraba el planeta distante brillando sobre el horizonte lunar. Anders no era consciente de que aquella imagen se convertiría en un icono para el movimiento ambiental mundial. Revelaba la delicada biosfera de la Tierra, en contraste con el estéril paisaje lunar en el que Neil Armstrong, un año después, daría su «pequeño paso». Otra imagen famosa la captó en 1990 la sonda Voyager 1 desde una distancia de seis mil millones de kilómetros. La tierra aparecía como un «punto azul pálido», que inspiró los pensamientos de Carl Sagan<sup>[45]</sup>:

Mira ese punto. Eso es aquí. Eso es nuestro hogar. Eso somos nosotros. Ahí han vivido todos los que amamos, todos los que conocemos, todo aquel de quien hayamos oído hablar alguna vez, todos los seres humanos que han existido. [...] Cada santo y cada pecador en la historia de nuestra especie vivió ahí: en una mota de polvo suspendida en un rayo de sol.

Nuestro planeta es una mota solitaria en la gran oscuridad cósmica que todo lo envuelve. No hay ni un indicio de que vaya a llegar ayuda desde algún otro lugar para salvarnos de nosotros mismos. La Tierra es el único mundo conocido hasta ahora que alberga vida. Nos guste o no, de momento la Tierra es donde hemos de quedarnos.

Estos sentimientos resuenan hoy en día; de hecho, hay un debate serio acerca de cómo la exploración cósmica, mucho más allá del sistema solar, hecha por máquinas si no por humanos, podría hacerse realidad, aunque fuera en el futuro remoto. (La Voyager 1 se encuentra ahora todavía, después de más de cuarenta años, en las afueras del sistema solar. Tardará decenas de miles de años en alcanzar la estrella más cercana).

Desde Darwin hemos sido conscientes de la larga historia de la Tierra. En *El origen de las especies* Darwin concluye con estas palabras familiares:



Mientras este planeta ha ido girando según la ley constante de la gravitación, a partir de un comienzo tan sencillo se desarrollaron y están evolucionando infinitas formas, cada vez más bellas y maravillosas.

Ahora especulamos sobre períodos de tiempo igualmente prolongados que se extienden hacia el futuro, y estos serán los temas de este capítulo.

El «comienzo sencillo» de Darwin (la joven Tierra) es complejo en su química y estructura. Los astrónomos aspiran a sondear todavía más atrás en el tiempo de lo que pudieron hacerlo Darwin y los geólogos: hasta el origen de los planetas, de las estrellas y de sus átomos constituyentes.

Todo nuestro sistema solar se condensó a partir de un disco giratorio de gas polvoriento hace unos 4500 millones de años. Pero ¿de dónde procedían los átomos?, ¿por qué son comunes los átomos de oxígeno y de hierro, pero no los de oro? Darwin no habría comprendido totalmente estas preguntas; en su época, la existencia misma de los átomos era controvertida. Pero ahora sabemos que no solo compartimos un origen común, y muchos genes, con toda la red de vida de la Tierra, sino que también estamos conectados con el cosmos. El Sol y las estrellas son reactores nucleares de fusión. Obtienen su energía de la fusión de hidrógeno en helio, y después de la de helio en carbono, oxígeno, fósforo y hierro, y otros elementos de la tabla periódica. Cuando las estrellas terminan su vida, expulsan el material «procesado» de nuevo al espacio interestelar (mediante explosiones de supernovas en el caso de las estrellas pesadas). Parte del material se recicla entonces en nuevas estrellas. El Sol fue una de ellas.

Un átomo de carbono típico, en una de las billones de moléculas de CO<sub>2</sub> que inhalamos en cada espiración, tiene una ajetreada historia que se remonta a más de cinco mil millones de años. El átomo fue liberado quizá a la atmósfera cuando se quemó un pedazo de carbón, carbón que a su vez era el resto de un árbol en un bosque primigenio hace doscientos millones de años, y antes de esto había ciclado entre la corteza de la Tierra, la biosfera y los océanos desde la formación misma de nuestro planeta. Remontándonos todavía más en el pasado encontraríamos que el átomo se forjó en una antigua estrella que explotó y eyectó átomos de carbono que vagaron por el espacio interestelar, se condensaron en un sistema protosolar y después en la joven Tierra. Somos, literalmente, las cenizas de estrellas que murieron hace mucho tiempo; o (de manera menos romántica) los residuos nucleares del combustible que hizo que las estrellas brillaran.

La astronomía es una ciencia antigua; quizá la más antigua aparte de la medicina (y yo diría que la primera que hizo más bien que mal: al mejorar el calendario, el control del tiempo y la navegación). Y durante las últimas décadas la exploración cósmica ha estado en racha. Hay pisadas humanas en la Luna. Unas sondas robóticas dirigidas a otros planetas han enviado imágenes de mundos fascinantes y diversos, y se han posado en algunos de ellos. Los telescopios modernos han ampliado nuestros horizontes cósmicos. Y estos telescopios han revelado un «zoo» de objetos extraordinarios: agujeros negros, estrellas de neutrones y explosiones colosales. Nuestro Sol está incrustado en nuestra galaxia, la Vía Láctea, que contiene más de cien mil millones de estrellas, todas ellas en órbita alrededor de un foco central en el que acecha un enorme agujero negro. Y esta es solo una de cien mil millones de galaxias visibles a través de los telescopios. Hemos detectado incluso «ecos» de la «gran explosión» que desencadenó todo nuestro universo en expansión hace 13 800 millones de años. Así es como nació el universo; y, con él, todas las partículas básicas de la naturaleza.

Los teóricos de salón, como yo mismo, pueden reclamar poco crédito por este progreso; se debe principalmente a mejoras en los telescopios, las naves espaciales y los ordenadores. Gracias a estos avances estamos empezando a entender la cadena de acontecimientos por los cuales, desde un inicio misterioso en que todo estaba comprimido a temperaturas y densidades inmensas, surgieron átomos, estrellas, galaxias y planetas; y cómo en un planeta, la Tierra, los átomos se ensamblaron en los primeros seres vivos, iniciando así la evolución darwiniana que ha conducido a organismos como nosotros, capaces de meditar sobre todos estos misterios.

La ciencia es una cultura realmente global, que abarca todas las fronteras de nacionalidad y credo. Esto es especialmente cierto en la astronomía. El cielo nocturno es la característica más universal de nuestro entorno. A lo largo de la historia humana, personas de todo el mundo han contemplado las estrellas, y las han interpretado de maneras distintas. Durante la última década el cielo nocturno se ha hecho muchísimo más interesante de lo que era para nuestros antepasados. Hemos descubierto que la mayoría de las estrellas no son solo puntos de luz que parpadean, sino que tienen planetas que orbitan a su alrededor, al igual que ocurre con el Sol. De manera asombrosa, nuestra galaxia alberga muchos millones de planetas como la Tierra, planetas que parecen habitables. Pero ¿están habitados realmente?, ¿existe vida, incluso vida inteligente, ahí fuera? Es difícil imaginar unas

preguntas de mayor importancia para comprender nuestro lugar en el plan cósmico de las cosas.

Es evidente, a partir de la extensa cobertura que de ello hacen los medios de comunicación, que estas cuestiones fascinan a millones de personas. Resulta gratificante para los astrónomos (y para los que se hallan en campos como la ecología) que sus ámbitos atraigan este amplio interés popular. Yo obtendría mucha menos satisfacción de mis investigaciones si solo pudiera comentarlas con unos pocos colegas especialistas. Además, el tema posee una imagen positiva y no amenazadora, en contraste con la ambivalencia pública de, pongamos por caso, la ciencia nuclear, la robótica o la genética.

Si viajo en avión y no quiero entablar una conversación con la persona del asiento de al lado, una manera de conseguirlo, es decir: «Soy matemático». En cambio, decir: «Soy astrónomo» suele estimular el interés. Y entonces la pregunta número uno es, por lo general, «¿Cree usted en extraterrestres, o estamos solos?». El tema también me fascina, de modo que siempre estoy dispuesto a discutirlo. Y tiene otra virtud como tema de conversación. Nadie conoce todavía la respuesta, de modo que no existe una barrera entre el «experto» y la persona que pregunta. No hay nada nuevo acerca de esta fascinación; pero ahora, por primera vez, tenemos esperanzas de una respuesta.

Las especulaciones sobre «la pluralidad de los mundos habitados» se remontan a la Antigüedad. Desde el siglo XVII al XIX se sospechaba de manera general que los demás planetas del sistema solar estaban habitados. El razonamiento era con más frecuencia teológico que científico. Eminentes pensadores del siglo XIX aducían que la vida tenía que impregnar el cosmos, porque de otro modo estos enormes dominios del espacio parecerían un desperdicio de los esfuerzos del Creador. Una divertida crítica de tales ideas se ofrece en el impresionante libro *Man's Place in the Universe*, de Alfred Russel Wallace, el otro promotor de la teoría de la selección natural<sup>[46]</sup>. Wallace es especialmente mordaz con el físico David Brewster (que los físicos recuerdan por el «ángulo de Brewster» en óptica), que sobre aquella base conjeturaba que incluso la Luna tenía que estar habitada. Brewster aducía en su libro *More Worlds Than One* que si la Luna...

[...] hubiera estado destinada a ser simplemente una lámpara para nuestra Tierra, no habría motivo para jaspear su superficie con elevadas montañas y volcanes extinguidos y cubrirla con grandes manchas de

materia que reflejan diferentes cantidades de luz y confieren a su superficie el aspecto de continentes y mares. Habría sido una lámpara mejor si hubiera sido un pedazo liso de caliza o creta.

A finales del siglo XIX, muchos astrónomos estaban tan convencidos de que existía vida en otros planetas del sistema solar que se ofreció un premio de cien mil francos a la primera persona que hiciera contacto. Y el premio excluía específicamente el contacto con marcianos: ¡esto se consideraba demasiado fácil! La afirmación errónea de que Marte estaba entrecruzado por canales se había considerado una prueba fehaciente de vida inteligente en el planeta rojo.

La era espacial aportó noticias que hicieron tocar de pies en el suelo. Venus, un planeta nebuloso que prometía un mundo tropical lujuriente y pantanoso, resultó ser un lugar horrible, aplastante y cáustico. Mercurio era una roca abrasadora y cacarañada. Incluso Marte, el planeta más parecido a la Tierra, se ha revelado ahora como un desierto helado con una atmósfera muy tenue. Sin embargo, la sonda Curiosity, de la NASA, puede haber encontrado agua. Y detectó gas metano que surgía de debajo de la superficie (procedente quizá de organismos en descomposición que vivieron hace mucho tiempo), aunque ahora no parece haber allí vida interesante.

En los objetos todavía más fríos más alejados del Sol, los entendidos apuestan por Europa, una de las lunas de Júpiter, y Encélado, una luna de Saturno. Estas se hallan cubiertas de hielo, y podría haber organismos nadando en los océanos situados debajo; se están diseñando sondas espaciales que los buscarían. Y podría haber vida exótica en los lagos de metano de Titán, otra de las lunas de Saturno. Pero nadie puede ser optimista.

En el sistema solar, la Tierra es el planeta Ricitos de Oro: ni muy caliente ni muy frío. Si fuera demasiado caliente, incluso la vida más tenaz se freiría. Pero si fuera demasiado frío, los procesos que crearon y alimentaron la vida habrían ocurrido demasiado lentamente. El descubrimiento de seres vivos, incluso vestigiales, en otras partes del sistema solar sería de importancia histórica. Esto es debido a que nos diría que la vida no fue una casualidad rara, sino que estaba muy extendida en el cosmos. De momento conocemos únicamente un lugar (la Tierra) en el que empezó la vida. Es lógicamente posible (de hecho, hay quienes afirman que es plausible) que el origen de la vida requiere unas contingencias tan especiales que solo ocurrió una vez en toda nuestra galaxia. Pero si surgió dos veces en el seno de un único sistema planetario, entonces debe ser común.

(Hay una condición importante: antes de establecer esta inferencia acerca de la ubicuidad de la vida hemos de estar seguros de que dos formas de vida surgieron de manera independiente en lugar de ser transportadas de una localidad a otra. Por esta razón, la vida bajo el hielo de Europa sentenciaría el caso más que la vida en Marte, porque es concebible que todos tengamos un abolengo marciano: habríamos evolucionado a partir de vida primitiva transportada en una roca expulsada de Marte por el impacto de un asteroide y propulsada hacia la Tierra).

## **MÁS ALLÁ DE NUESTRO SISTEMA SOLAR**

Para encontrar lugares en los que la vida pueda existir, hemos de extender nuestra mirada más allá de nuestro sistema solar: más allá del alcance de cualquier sonda que podamos diseñar en la actualidad. Lo que ha transformado y revitalizado todo el campo de la exobiología es que nos hemos dado cuenta de que la mayoría de las estrellas tienen planetas que orbitan a su alrededor. El monje italiano Giordano Bruno especuló acerca de ello en el siglo XVI. Desde la década de 1940, los astrónomos sospecharon que estaba en lo cierto. Para entonces, una teoría anterior según la cual el sistema solar se formó a partir de un filamento arrancado del Sol por la atracción gravitatoria de una estrella que pasó cerca de este (lo que habría implicado que los sistemas planetarios eran raros) ya había quedado desacreditada. Esta teoría fue superada por la idea de que cuando una nube interestelar se contraía debido a la gravedad para formar una estrella, si giraba «segregaría» un disco cuyos gas y polvo constituyentes se aglomerarían en planetas. Pero la evidencia de exoplanetas no empezó a surgir hasta la década de 1990. La mayoría de los exoplanetas no se detectan directamente: se infieren a partir de la observación detenida de la estrella a la que orbitan. Hay dos técnicas principales.

La primera es esta. Si una estrella tiene un planeta que orbita a su alrededor, entonces tanto el planeta como la estrella se desplazan alrededor de su centro de masa, lo que se denomina baricentro. La estrella, al ser más voluminosa, se desplaza más lentamente. Pero el movimiento cíclico inducido por un planeta que orbita puede detectarse por el estudio preciso de la luz de la estrella, que revela un efecto Doppler cambiante. El primer éxito tuvo lugar en 1995, cuando Michel Mayor y Didier Queloz, que trabajaban en el Observatorio de Ginebra, encontraron un planeta «de la masa de Júpiter»

alrededor de la estrella cercana 51 Pegasi<sup>[47]</sup>. En los años siguientes, se han encontrado de esta manera más de cuatrocientos exoplanetas. Esta técnica de «bamboleo estelar» se aplica principalmente a planetas «gigantes», objetos del tamaño de Saturno o Júpiter.

Los posibles «gemelos» de la Tierra son especialmente interesantes: planetas del mismo tamaño que el nuestro, que orbiten alrededor de otras estrellas del tipo del Sol, en órbitas tales que la temperatura haga que el agua ni hierva ni se congele. Pero detectar estos planetas (cientos de veces menos voluminosos que Júpiter) es un auténtico reto. Estos inducen bamboleos de solo unos centímetros por segundo en su estrella madre, movimiento hasta ahora demasiado pequeño para que el método Doppler lo detecte (aunque la instrumentación progresa rápidamente).

Pero hay una segunda técnica: podemos buscar las sombras del planeta. Una estrella atenuará ligeramente su emisión de luz cuando un planeta se encuentre «en tránsito» frente a ella; tales atenuaciones se repetirán a intervalos regulares. Datos de este tipo revelan dos cosas: el intervalo entre sucesivas atenuaciones nos dice la duración del año del planeta, y la amplitud de la atenuación nos dice qué fracción de la luz de la estrella bloquea el planeta durante el tránsito, y por lo tanto lo grande que es.

Hasta ahora, la búsqueda más importante para planetas que transitan la ha llevado a cabo una nave espacial de la NASA bautizada con el nombre del astrónomo Johannes Kepler<sup>[48]</sup>, que pasó más de tres años midiendo el brillo de 150 000 estrellas, hasta una precisión de una parte en 100 000. Hizo esto una o más veces cada hora para cada estrella. La nave Kepler ha encontrado miles de planetas en tránsito, algunos de ellos no mayores que la Tierra. El impulsor del Proyecto Kepler fue Bill Borucki, un ingeniero norteamericano que había trabajado para la NASA desde 1964. Concibió la idea en la década de 1980 e insistió tercamente en ella a pesar de los contratiempos de financiación y del escepticismo inicial por parte de muchos de los astrónomos «establecidos». Su éxito triunfante, conseguido cuando Borucki ya pasaba de los setenta años, merece un aplauso especial. Nos recuerda lo mucho que incluso la ciencia «más pura» debe a los constructores de instrumentos.

Hay variedad en los exoplanetas ya descubiertos. Algunos siguen órbitas excéntricas. Y un planeta tiene cuatro soles en su cielo; orbita alrededor de una estrella binaria, en torno a la cual orbita a su vez otra estrella binaria. Este descubrimiento implicó a «cazaplanetas» aficionados; cualquier entusiasta tuvo la oportunidad de acceder a los datos de la nave Kepler correspondientes a algunas estrellas, y el ojo humano pudo advertir «bajadas» en el brillo de las

estrellas (que se producían de manera menos regular que en el caso de un planeta que orbita alrededor de una única estrella).

Hay un planeta que orbita alrededor de la estrella más cercana, Próxima Centauri, que se halla a solo cuatro años luz de la Tierra. Próxima Centauri es una estrella de las llamadas enanas M, unas cien veces más débil que nuestro Sol. En 2017, un equipo dirigido por el astrónomo belga Michaël Gillon descubrió un sistema solar en miniatura alrededor de otra enana M;<sup>[49]</sup> a su alrededor orbitan siete planetas con «años» que duran de 1,5 a 18,8 días terrestres. Los tres más externos se hallan en la zona habitable. Serían lugares espectaculares en los que vivir. Vistos desde la superficie de uno de los planetas, los otros recorrerían rápidamente el cielo, y resultarían tan grandes como nuestra Luna para nosotros. Pero son muy poco parecidos a la Tierra. Probablemente tienen acoplamiento de marea, de manera que presentan la misma cara a su estrella: un hemisferio bajo luz perpetua y el otro siempre oscuro. (En la improbable situación de que albergara vida inteligente, se daría una especie de «segregación»: ¡los astrónomos en cuarentena en un hemisferio, todos los demás en el otro!). Pero es probable que sus atmósferas hayan sido eliminadas por los intensos estallidos magnéticos que son comunes en las estrellas enanas M, lo que los haría menos propicios para la vida.

Casi todos los exoplanetas conocidos se han inferido de manera indirecta, al detectar su efecto sobre los movimientos o el brillo de las estrellas alrededor de las cuales orbitan. Nos gustaría mucho verlos directamente, pero esto es difícil. Para darse cuenta de lo complicado que es, suponga el lector que existen extraterrestres, y que un astrónomo extraterrestre con un telescopio potente estuviera observando la Tierra desde una distancia (pongamos por caso) de treinta años luz: la distancia de una estrella cercana. Nuestro planeta parecería, en la frase de Carl Sagan, un «punto azul pálido», muy cercano a una estrella (nuestro Sol) que es muchos miles de millones de veces más brillante que la Tierra: una luciérnaga junto a un foco reflector. El matiz de azul sería ligeramente diferente, en función de si fuera el océano Pacífico o la masa continental de Eurasia lo que percibieran los astrónomos extraterrestres. Estos podrían inferir la duración de nuestro día, las estaciones, la existencia de continentes y océanos, y el clima. Al analizar la débil luz, los astrónomos podrían deducir que la Tierra tiene una superficie verde y una atmósfera oxigenada.

Hoy en día, los mayores telescopios terrestres los construyen consorcios internacionales. Proliferan en Mauna Kea (Hawái) y bajo los cielos secos y

claros de los altos Andes en Chile<sup>[50]</sup>. Y Sudáfrica no solo tiene uno de los mayores telescopios ópticos del mundo, sino que también tendrá un papel de liderazgo, junto a Australia, en la construcción del mayor radiotelescopio del mundo, el Square Kilometre Array<sup>[51]</sup>. Un telescopio que se está construyendo actualmente en una cumbre chilena por parte de astrónomos europeos tendrá la sensibilidad necesaria para captar luz procedente de planetas del mismo tamaño que la Tierra y que orbiten alrededor de otras estrellas del tipo del Sol. Se denomina European Extremely Large Telescope (E-ELT)<sup>[52]</sup>, ¡una nomenclatura más literal que imaginativa! El primer telescopio reflector de Newton tenía un espejo de 10 centímetros de diámetro; el E-ELT tendrá 39 metros: un mosaico de pequeños espejos con un área recolectora total más de cien mil veces mayor.

A partir de las estadísticas de planetas situados alrededor de estrellas cercanas que se han estudiado hasta ahora, podemos concluir que toda la Vía Láctea alberga alrededor de mil millones de planetas que son «de tipo terrestre» en el sentido de que tienen el tamaño aproximado de la Tierra y se hallan a una distancia de su estrella madre que permite que pueda existir agua, sin que esta hierva ni que se halle congelada permanentemente. Podemos esperar que sean muy variados: algunos podrían ser «mundos acuáticos», completamente cubiertos por océanos; otros podrían (como Venus) haberse calentado y esterilizado por un «efecto invernadero» extremo.

¿Cuántos de estos planetas podrían albergar seres vivos mucho más interesantes y exóticos que cualquier cosa que pudiéramos encontrar en Marte, incluso algo que pudiera considerarse inteligente? No sabemos cuáles son las probabilidades. De hecho, no podemos excluir todavía la posibilidad de que el origen de la vida (la aparición, a partir de una «mezcla» química, de una entidad que metabolizara y se reprodujera) implicara una suerte tan excepcional que ocurriera solo una vez en toda nuestra galaxia. Por otra parte, esta transición crucial pudo haber sido casi inevitable dado el ambiente «adecuado». Simplemente, no lo sabemos; ni sabemos si la química de ADN/ARN de la vida terrestre es la única posibilidad, o solo una base química entre muchas opciones que en otros lugares pudieron realizarse. Y, algo más fundamental incluso, ni siquiera sabemos si el agua líquida es realmente crucial. Si existiera una ruta química por la que pudiera surgir la vida en los fríos lagos de metano de Titán, nuestra definición de «planetas habitables» sería mucho más amplia.

Puede que estas cuestiones clave se aclaren pronto. El origen de la vida atrae actualmente un mayor interés; ya no se considera que se trate de uno de



esos problemas ultraexigentes (la consciencia, por ejemplo, se halla todavía en esta categoría) que, aunque son manifiestamente importantes, no parecen oportunos o tratables, y se relegan a la caja de los problemas «demasiado difíciles». Comprender los inicios de la vida es importante no solo para evaluar la probabilidad de vida extraterrestre, sino porque la aparición de la vida en la Tierra sigue siendo un misterio.

Tendríamos que ser amplios de miras acerca de dónde podría aparecer la vida en el cosmos y qué formas podría adoptar, y dedicarnos a pensar un poco en una vida no parecida a la de la Tierra en lugares no parecidos a la Tierra. Incluso aquí en la Tierra, la vida sobrevive en los lugares más inhóspitos: en cuevas oscuras en las que la luz no ha llegado desde hace miles de años, dentro de rocas de desiertos áridos, a gran profundidad bajo tierra y alrededor de las fumarolas de agua caliente en los fondos más profundos de los océanos. Pero vale la pena empezar con lo que sabemos (la estrategia de «buscar bajo la luz de la farola») y desplegar todas las técnicas disponibles para descubrir si alguna atmósfera de exoplanetas del tipo de la Tierra presenta la evidencia de una biosfera. En la próxima década o dos décadas nos llegarán las pistas procedentes del Telescopio Espacial James Webb y del E-ELT y otros telescopios gigantes similares en tierra que entrarán en funcionamiento en la década de 2020.

Incluso estos telescopios de la siguiente generación tendrán una ardua tarea a la hora de separar el espectro de la atmósfera del planeta del espectro de la estrella central, más brillante. Pero, si superamos la mitad del siglo, podemos imaginar un conjunto de enormes telescopios espaciales, cada uno de ellos con espejos cuya longitud se mida en kilómetros y delgados como telarañas, ensamblados en el espacio profundo por fabricantes robóticos. Hacia 2068, el centenario de la fotografía de la «salida de la Tierra» del Apolo 8, un instrumento de este tipo podría proporcionarnos una imagen todavía más inspiradora: otra Tierra orbitando una estrella lejana.

## **VUELOS ESPACIALES, TRIPULADOS Y NO TRIPULADOS**

Entre mis lecturas infantiles favoritas (en Inglaterra, en la década de 1950) había un cómic llamado *Eagle*, en especial las aventuras de «Dan Dare, piloto del futuro», en el que el brillante material gráfico ilustraba ciudades en órbita, mochilas cohete e invasores extraterrestres. Cuando los vuelos espaciales se hicieron reales, los trajes que llevaban los astronautas de la NASA (y sus

equivalentes soviéticos, los «cosmonautas») resultaban por ello familiares, como lo eran las rutinas de lanzamiento, atraque, etc. Mi generación seguía ávidamente la sucesión de hazañas pioneras y heroicas: el primer vuelo orbital de Yuri Gagarin, el primer paseo espacial de Alexey Leonov y después, desde luego, los alunizajes. Recuerdo una visita que hizo John Glenn, el primer norteamericano que entró en órbita, a mi ciudad natal. Se le preguntó qué pensaba cuando se hallaba en el cono frontal del cohete, a la espera del lanzamiento. Respondió: «Pensaba que en aquel cohete había veinte mil partes, y que cada una la había fabricado el que había hecho la oferta más baja». (Más adelante, Glenn se convertiría en senador de los Estados Unidos y, más tarde todavía, en el astronauta más anciano cuando, a la edad de setenta y siete años, formó parte de la tripulación de la lanzadera espacial STS-95).

Solo transcurrieron doce años entre el vuelo del Sputnik 1 soviético (el primer objeto artificial que se puso en órbita) y el histórico «un pequeño paso» sobre la superficie lunar en 1969. No contemplo nunca la Luna sin recordar a Neil Armstrong y Buzz Aldrin. Sus hazañas parecen todavía más heroicas en retrospectiva, cuando nos damos cuenta de hasta qué punto dependían de una computación primitiva y de equipo que no se había probado previamente. En realidad, William Safire, el redactor de los discursos del presidente Nixon, había preparado un panegírico para que se leyera en el caso de que los astronautas hiciesen un alunizaje de emergencia o se quedaran varados allí:

El destino ha ordenado que los hombres que fueron a la Luna para explorar en paz permanezcan en la Luna para descansar en paz. Ellos saben que no hay esperanzas de recuperarlos. Pero también saben que hay esperanzas para la humanidad en su sacrificio.

El programa Apolo sigue siendo, medio siglo más tarde, el punto álgido de la aventura humana en el espacio. Era una «carrera espacial» contra los rusos, una competición en la rivalidad de las superpotencias. Si se hubiera mantenido aquel impulso, seguramente ahora habría huellas humanas en Marte; esto es lo que nuestra generación esperaba. Sin embargo, una vez que aquella carrera se hubo ganado, no había motivos para continuar con el gasto necesario. En la década de 1960, la NASA absorbió más del 4 % del presupuesto federal de los Estados Unidos. La cifra actual es el 0,6 %. Los jóvenes de hoy en día saben que los norteamericanos pusieron los pies en la Luna. Saben que los egipcios construyeron las pirámides. Pero estas empresas

parecen historia antigua, motivadas por objetivos nacionales extraños por igual.

Otros cientos se han aventurado en el espacio en las décadas siguientes. Sin embargo, de forma decepcionante, no han hecho más que rodear la Tierra en órbitas bajas. La Estación Espacial Internacional (ISS) fue probablemente el artefacto más caro que jamás se haya construido. Su coste, más el de las lanzaderas cuyo objetivo principal era aprovisionarla y repararla (aunque ahora se han retirado del servicio), alcanzaba las doce cifras. El rendimiento científico y técnico de la ISS no ha sido desdeñable, pero ha sido menos rentable que el de las misiones no tripuladas. Y estos viajes tampoco son inspiradores de la manera en que lo fueron las hazañas espaciales pioneras de rusos y estadounidenses. La ISS solo aparece en las noticias cuando algo va mal: cuando falla el aseo, por ejemplo; o cuando los astronautas demuestran sus «habilidades», como el canadiense Chris Hadfield, que toca la guitarra y canta.

La interrupción de la exploración espacial tripulada ejemplifica que, cuando no existe demanda política o económica, lo que se hace realmente es mucho menos de lo que podría conseguirse. (Los vuelos supersónicos son otro ejemplo; el avión Concorde siguió el camino de los dinosaurios. En cambio, los negocios derivados de la tecnología de la información han avanzado, y se han extendido mundialmente, mucho más deprisa de lo que predecían los analistas y los gurús de la gestión).

No obstante, la tecnología espacial ha florecido en las dos últimas décadas. Dependemos de forma rutinaria de satélites en órbita para la comunicación, la navegación, el seguimiento ambiental, la vigilancia y la previsión meteorológica. Estos servicios emplean naves espaciales que, aunque no tripuladas, son caras y complejas. Pero hay un mercado creciente para satélites miniaturizados relativamente baratos, de cuya demanda esperan ocuparse varias compañías privadas.

PlanetLab, una compañía con sede en San Francisco, ha desarrollado y lanzado enjambres de naves espaciales del tamaño de cajas de zapatos con la misión colectiva de obtener imágenes repetidas con una cobertura global, aunque a una resolución no especialmente grande (3-5 metros): el mantra (con solo un poco de exageración) es observar cada árbol del mundo cada día. Ochenta y ocho de estas naves se lanzaron en 2017 como carga de un único cohete indio; se han empleado cohetes rusos y estadounidenses para lanzar más, así como una flota de SkySats, que son algo mayores y equipados de manera más compleja (cada uno de ellos pesa 100 kilogramos). Para una

resolución mucho mejor se necesita un satélite mayor con óptica más refinada, pero existe no obstante un mercado comercial para estos minúsculos «satélites cúbicos» para hacer el seguimiento de campos de cultivo, lugares de construcción, barcos de pesca y cosas por el estilo; también son útiles para planificar respuestas a los desastres. Ahora puede hacerse uso incluso de satélites más pequeños, delgados como obleas, que explotan la tecnología que ha surgido de la colosal inversión en microelectrónica de consumo.

Los telescopios en el espacio proporcionan un enorme impulso a la astronomía. Al orbitar muy por encima de los efectos emborronadores y absorbentes de la atmósfera de la Tierra, han enviado imágenes nítidas procedentes de las partes más remotas del cosmos. Han supervisado el cielo en las bandas de infrarrojo, de ultravioleta, de rayos X y rayos gamma que no penetran en la atmósfera y, por lo tanto, no pueden observarse desde tierra. Han revelado la existencia de agujeros negros y otros objetos exóticos y han sondeado con gran precisión el «resplandor de la creación»: las microondas que impregnan todo el espacio y cuyas propiedades contienen pistas del principio mismo, cuando todo el cosmos observable estaba comprimido a un tamaño microscópico.

De interés público más inmediato son los hallazgos de naves espaciales que han viajado a todos los planetas del sistema solar. La New Horizons, de la NASA, transmitió imágenes sorprendentes de Plutón, diez mil veces más alejado que la Luna. Y la Rosetta, de la Agencia Espacial Europea (ESA), hizo descender un robot en un cometa. Hicieron falta cinco años para diseñar y construir estas naves, y después casi diez años para que viajaran hasta sus objetivos remotos. La sonda Cassini pasó trece años estudiando Saturno y sus lunas y era todavía más venerable: pasaron más de veinte años entre su lanzamiento y su zambullida final en Saturno a finales de 2017. No es difícil imaginar lo mucho más sofisticado que el seguimiento de estas misiones puede ser en la actualidad.

Durante este siglo, todo el sistema solar (planetas, lunas y asteroides) se explorará y cartografiará por flotas de sondas espaciales robóticas diminutas, que interactuarán entre sí como una bandada de aves. Robots fabricantes gigantes podrán construir, en el espacio, colectores de energía solar y otros objetos. Los sucesores del telescopio Hubble, con espejos descomunales ensamblados en gravedad cero, ampliarán todavía más nuestra visión de exoplanetas, estrellas, galaxias y el universo lejano. El paso siguiente sería la minería y la fabricación espaciales.

Pero ¿habrá un papel para los humanos? No puede negarse que el Curiosity, construido por la NASA, un vehículo del tamaño de un coche pequeño que desde 2011 ha estado moviéndose con dificultad por un cráter marciano gigante, puede haber pasado por alto descubrimientos sorprendentes que ningún geólogo humano hubiera ignorado. Pero el aprendizaje automático está avanzando rápidamente, como la tecnología de los sensores. En contraste, la brecha en el coste entre las misiones tripuladas y no tripuladas sigue siendo muy grande. La defensa práctica de los vuelos espaciales tripulados se hace más débil con cada avance en robótica y miniaturización.

Si hubiera un resurgimiento del «espíritu del Apolo» y un nuevo deseo de basarse en su herencia, el siguiente paso creíble sería una base lunar habitada de forma permanente. Su construcción la podrían llevar a cabo robots, que traerían suministros desde la Tierra y extraerían algunos de la Luna. Un lugar especialmente propicio es el cráter Shackleton, en el polo sur lunar, que tiene 21 kilómetros de diámetro y un borde de 4 kilómetros de altitud. Debido a la situación del cráter, su borde se halla siempre iluminado y así escapa de los contrastes mensuales extremos de temperatura que se experimentan en casi toda la superficie de la Luna. Además, puede haber mucho hielo en el interior perpetuamente oscuro del cráter, lo que es crucial, desde luego, para mantener una «colonia».

Tendría sentido construir en la mitad de la Luna que está encarada a la Tierra. Pero hay una excepción: los astrónomos querrían un telescopio gigante en el lado alejado porque entonces estaría protegido de las emisiones artificiales de la Tierra, lo que ofrecería una gran ventaja a los radioastrónomos que buscaran detectar emisiones cósmicas muy débiles.

El programa espacial tripulado de la NASA, ya desde el Apolo, se ha visto forzado por la presión pública y política a ser contrario al riesgo. La lanzadera espacial falló dos veces en 135 lanzamientos. Los astronautas o los pilotos de pruebas aceptarían voluntariamente este nivel de riesgo: menos del 2%. Pero, de forma imprudente, la lanzadera se había promovido como un vehículo seguro para civiles (y una maestra, Christa McAuliffe, del Proyecto Profesor en el Espacio, de la NASA, fue una de las bajas del desastre del Challenger). Cada fallo causó un trauma nacional en los Estados Unidos y lo siguió una interrupción mientras se hacían costosos esfuerzos (con un efecto muy limitado) para reducir todavía más los riesgos.

Tengo la esperanza de que algunas personas que ya han nacido podrán caminar sobre Marte, como una aventura y como un paso hacia las estrellas. Pero la NASA se enfrentará a obstáculos políticos para conseguir este

objetivo con un presupuesto viable. China tiene los recursos, el gobierno dirigista y quizá la disposición para emprender un programa del estilo del Apolo. Si quisiera reivindicar su condición de superpotencia mediante un programa «espacial espectacular» y proclamar la paridad, China necesitaría superar, más que únicamente repetir, lo que los Estados Unidos consiguieron cincuenta años antes. Ya está planeando uno de tales logros: alunizar en la cara oculta de la Luna<sup>[53]</sup>. Un «gran salto adelante» más evidente sería dejar huellas en Marte, no solo en la Luna.

Dejando aparte a los chinos, creo que el futuro de los vuelos espaciales tripulados está en manos de aventureros con financiación privada, preparados para participar en un programa de costes reducidos, más arriesgado de lo que las naciones occidentales podrían imponer a civiles respaldados con fondos públicos. SpaceX, dirigido por Elon Musk (quien también construye los automóviles eléctricos Tesla), o la empresa rival, Blue Origin, financiada por Jeff Bezos, fundador de Amazon, han atracado naves en la estación espacial y pronto ofrecerán vuelos orbitales a clientes dispuestos a pagar por ello. Estas empresas (que aportan la cultura de Silicon Valley a un ámbito que durante mucho tiempo dominaron la NASA y unas pocas corporaciones aeroespaciales) han demostrado que es posible recuperar y reutilizar la primera fase del cohete de lanzamiento, lo que hace predecir ahorros reales en los costes. Han innovado y mejorado la ingeniería espacial mucho más deprisa de lo que lo han hecho la NASA o la ESA: un cohete Falcon de SpaceX puede colocar una carga de cincuenta toneladas en órbita. El papel futuro de las agencias nacionales se atenuará, y será más parecido al de un aeropuerto que al de una aerolínea.

Si yo fuera ciudadano de los Estados Unidos, no apoyaría el programa tripulado de la NASA; aduciría que unas compañías privadas impulsadas de forma inspiradora deberían «liderar» todas las misiones tripuladas como aventuras de riesgo elevado a precios reducidos. Todavía habría muchos voluntarios (algunos de los cuales quizá incluso aceptarían «billetes de solo ida»), movidos por los mismos motivos que impulsaron a los primeros exploradores, montañeros, etc. De hecho, ya es hora de evitar la mentalidad de que las aventuras espaciales deberían ser proyectos nacionales (e incluso internacionales), además de la retórica pretenciosa en la que la palabra «nosotros» se emplea para referirse a toda la humanidad. Existen algunos esfuerzos (habérselas con el cambio climático, por ejemplo) que no pueden llevarse a cabo sin la acción internacional concertada. La explotación del

espacio no tiene por qué ser de esta naturaleza; quizá necesite algo de reglamentación pública, pero el ímpetu puede ser privado o empresarial.

Existen planes para viajes de una semana alrededor de la cara oculta de la Luna: viajar más lejos de la Tierra de lo que nadie ha hecho antes (pero evitando el riesgo mayor de un alunizaje y despegue). Me dicen que se ha vendido un billete para el segundo de tales vuelos, pero no para el primero. Y Dennis Tito, un empresario y exastronauta, ha propuesto, cuando se disponga de un nuevo cohete lanzador capaz de levantar grandes pesos, enviar personas a Marte en viajes de ida y vuelta, sin amartizar. Esto requeriría pasar quinientos días en un confinamiento aislado. La tripulación ideal sería una pareja estable de mediana edad, lo bastante mayores para que no les importara la elevada dosis de radiación acumulada en el viaje.

Hay que evitar la frase «turismo espacial». Hace que la gente crea que estas aventuras son rutinarias y de poco riesgo. Y si esta es la percepción, los inevitables accidentes serán tan traumáticos como los de la lanzadera espacial. Estas hazañas han de «venderse» como deportes peligrosos, o como exploración intrépida.

El impedimento más fundamental para los vuelos espaciales, en órbita alrededor de la Tierra o para los que se aventuren más allá, proviene de la ineficiencia intrínseca del combustible químico y de la consecuente necesidad de cohetes lanzadores para que lleven una carga de combustible cuyo peso excede con mucho al de la carga. Mientras dependamos de combustibles químicos, los viajes interplanetarios seguirán siendo un reto. La energía nuclear podría ser transformadora. Al permitir velocidades mucho mayores durante la trayectoria, reduciría drásticamente los tiempos de tránsito hasta Marte o los asteroides (lo que haría disminuir no solo el aburrimiento de los astronautas, sino también su exposición a la radiación dañina).

Se conseguiría una mayor eficiencia si el suministro de combustible pudiera estar en tierra y no tuviera que llevarse al espacio. Por ejemplo, podría ser técnicamente posible poner naves espaciales en órbita mediante un «ascensor espacial», una cuerda de fibra de carbono de 30 000 kilómetros de longitud anclada en la Tierra (y accionada desde tierra), que se extendiera verticalmente más allá de la distancia de una órbita geoestacionaria, de manera que se mantuviera tirante por fuerzas centrífugas. Un plan alternativo imagina un potente haz de láser generado en la Tierra que impulsa una «vela» fijada a la nave espacial; esto podría ser viable para sondas espaciales de peso ligero y en principio podría acelerarlas hasta el 20 % de la velocidad de la luz<sup>[54]</sup>.

Incidentalmente, un combustible a bordo pero más eficiente podría transformar los vuelos espaciales tripulados desde una operación de alta precisión hasta una operación casi no cualificada. Conducir un automóvil sería una empresa difícil si, como ocurre en la actualidad con los viajes espaciales, se tuviera que programar todo el viaje en detalle previamente, con oportunidades mínimas para conducir a lo largo de la ruta. Si hubiera combustible abundante para correcciones a medio camino (y para frenar y acelerar a voluntad), entonces la navegación interplanetaria sería una tarea que no necesitaría mucha habilidad: más sencilla, incluso, que conducir un automóvil o un barco, en el sentido de que siempre se ve claramente el destino.

En 2100, los buscadores de emociones del estilo de (pongamos por caso) Felix Baumgartner (el paracaidista austriaco que en 2012 rompió la barrera del sonido al lanzarse en caída libre desde un globo a gran altitud) quizá hayan establecido «bases» independientes de la Tierra: en Marte, o quizá en asteroides. Elon Musk (nacido en 1971), de SpaceX, dice que quiere morir en Marte... pero no de un impacto. Sin embargo, no cabe esperar una migración en masa desde la Tierra. Y aquí estoy en completo desacuerdo con Musk y con mi antiguo colega de Cambridge Stephen Hawking, quienes se entusiasman ante la posibilidad de un desarrollo rápido de comunidades marcianas a gran escala. Es una ilusión peligrosa creer que el espacio ofrece una huida de los problemas de la Tierra. Hemos de resolver estos problemas aquí. Habérselas con el cambio climático puede parecer intimidante, pero es pan comido comparado con terraformar Marte. No hay ningún lugar en nuestro sistema solar que ofrezca un ambiente al menos tan clemente como la Antártida o la cumbre del Everest. No existe un «Planeta B» para la gente normal a la que no le gusta el riesgo.

Pero nosotros (y nuestra progenie aquí en la Tierra) hemos de aplaudir a los valientes aventureros espaciales, porque desempeñarán un papel fundamental a la hora de encabezar el futuro poshumano y de determinar qué ocurrirá en el siglo XXII y más allá.

## **¿HACIA UNA ERA POSHUMANA?**

¿Por qué serán tan importantes estos aventureros del espacio? El ambiente espacial es intrínsecamente hostil para los humanos. Así, debido a que estarán mal adaptados a su nuevo hábitat, los exploradores pioneros tendrán un



incentivo más convincente para rediseñarse que aquellos de nosotros que permanezcamos en la Tierra. Emplearán las superpotentes tecnologías genéticas y de cibernéticos que se desarrollarán en las épocas venideras. Cabe esperar que dichas técnicas estén muy reguladas en la Tierra, sobre bases de prudencia y ética, pero los «colonos» en Marte se hallarán muy lejos de las garras de los reguladores. Hemos de desearles buena suerte en la modificación de su progenie para que se adapte a ambientes extraños. Este podría ser el primer paso hacia la divergencia en una nueva especie. La modificación genética estará complementada por tecnología cibernética; en realidad, podría haber una transición hacia una inteligencia completamente inorgánica. Así pues, serán estos aventureros que viajarán al espacio, y no los que estemos confortablemente adaptados a la vida en la Tierra, los que encabezarán la era poshumana.

Antes de salir de la Tierra, y sea cual sea su destino, los viajeros del espacio ya sabrán lo que les espera al final del viaje; les habrán precedido sondas robóticas. Los exploradores europeos de siglos anteriores que se aventuraban a través del Pacífico iban hacia lo desconocido en una medida mucho mayor de lo que haría cualquier explorador futuro (y se enfrentaban a peligros más terribles): no había expediciones precursoras que cartografiaran, como ocurrirá en las aventuras del espacio. Los viajeros espaciales futuros podrán comunicarse siempre con la Tierra (aunque con una demora temporal). Si las sondas precursoras han revelado que hay maravillas que explorar, habrá un motivo convincente, de la misma manera que el capitán Cook tuvo el incentivo de la biodiversidad y las bellezas de las islas del Pacífico. Pero si ahí fuera no hay más que esterilidad, será mejor dejar los viajes a fabricantes robóticos.

Los organismos orgánicos necesitan un ambiente planetario superficial, pero si los poshumanos hacen la transición a inteligencias completamente inorgánicas, no necesitarán una atmósfera. Y quizá prefieran una gravedad cero, especialmente para construir hábitats extensos, pero de poco peso. De modo que será en el espacio profundo (no en la Tierra, ni siquiera en Marte) donde unos «cerebros» no biológicos podrán desarrollar poderes que los humanos no podemos siquiera imaginar. Las escalas temporales para el avance tecnológico no son más que un instante comparadas con la selección natural darwiniana que condujo a la aparición de los humanos y (lo que es más relevante) son menos de una millonésima parte de las vastas extensiones de tiempo cósmico que tenemos por delante. Los resultados de la evolución

tecnológica futura pueden sobrepasar a los humanos tanto como (desde el punto de vista intelectual) nosotros superamos a los mohos mucilaginosos.

Es probable que los «inorgánicos» (robots electrónicos inteligentes) terminen predominando. Ello se debe a que existen límites químicos y metabólicos al tamaño y capacidad procesadora de los cerebros orgánicos «húmedos». Quizá ya estemos cerca de dichos límites. Pero tales límites no constriñen a los ordenadores electrónicos (y quizá menos todavía a los ordenadores cuánticos). Así, según cualquier definición de «pensar», la cantidad e intensidad con que lo hacen los cerebros orgánicos de tipo humano se verán absolutamente saturadas por las elucubraciones de la IA. Quizá nos hallemos cerca del fin de la evolución darwiniana, pero apenas está empezando un proceso más rápido, la mejora de la inteligencia dirigida de forma artificial. Esto ocurrirá con mucha más rapidez lejos de la Tierra; yo no esperarí (y ciertamente no desearí) que dichos cambios rápidos en la humanidad se produjeran aquí en la Tierra, aunque nuestra supervivencia dependerá de que la IA en la Tierra siga siendo «benévola».

Los filósofos debaten si la «consciencia» es especial de los cerebros de humanos, simios y perros. ¿Podría ser que los robots, aunque sus intelectos parezcan suprahumanos, siguieran careciendo de consciencia de sí mismos o de vida interior? La respuesta a esta pregunta afecta de manera crucial a cómo reaccionemos ante su «toma del poder». Si las máquinas son zombis, no concederíamos a sus experiencias el mismo valor que a las nuestras, y el futuro poshumano parecería deprimente. Pero si son conscientes, ¿por qué no habríamos de dar la bienvenida a la perspectiva de su hegemonía futura?

Las situaciones hipotéticas que acabo de describir tendrían la consecuencia (un aumento de la autoestima humana) de que, aunque la vida se hubiera originado solo en la Tierra, no tendría por qué seguir siendo una característica trivial del cosmos; los humanos pueden estar más cerca del inicio que del final de un proceso por el que una inteligencia cada vez más compleja se extienda por la galaxia. El salto a las estrellas cercanas es solo un primer paso en este proceso. Los viajes interestelares (o incluso los viajes intergalácticos) no supondrían ningún terror para entidades cuasimortales.

Aunque no seamos la rama terminal de un árbol evolutivo, los humanos podemos reclamar una verdadera importancia cósmica por haber iniciado la transición a entidades electrónicas (y potencialmente inmortales), que extienden su influencia mucho más allá de la Tierra, y que trascienden, con mucho, nuestras limitaciones.

Pero los motivos y las limitaciones éticas dependerán entonces de la respuesta a una gran pregunta astronómica: ¿acaso ya hay vida (vida inteligente) ahí fuera?

## **¿INTELIGENCIA EXTRATERRESTRE?**

La evidencia clara de vegetación, bichos primitivos o bacterias en un exoplaneta sería importante. Pero lo que anima realmente la imaginación popular es la perspectiva de vida avanzada: los extraterrestres con los que la ciencia ficción nos ha familiarizado<sup>[55]</sup>.

Incluso si la vida primitiva fuera común, la vida «avanzada» podría no serlo: su aparición puede depender de muchas contingencias. El curso de la evolución en la Tierra estuvo influido por fases de glaciación, por la historia tectónica de nuestro planeta, por impactos de asteroides, etc. Varios autores han especulado sobre «cuellos de botella» evolutivos: fases clave que son difíciles de transitar. Quizá la transición a la vida multicelular (que en la Tierra duró dos mil millones de años) sea una de ellas. O el «cuello de botella» pudo ocurrir más tarde. Por ejemplo, si los dinosaurios no hubieran sido aniquilados, la cadena de evolución de los mamíferos que condujo a los humanos podría no haberse dado; no podemos predecir si otra especie hubiera asumido nuestro papel. Algunos evolucionistas consideran que la aparición de la inteligencia es una contingencia improbable, incluso en una biosfera compleja.

Quizá, y esto sería más agorero, podría haber un «cuello de botella» en nuestra propia fase evolutiva: la fase en la que nos hallamos en este siglo, cuando la vida inteligente desarrolla una tecnología potente. El pronóstico a largo plazo para una vida «originada en la Tierra» depende de si los humanos sobreviven a esta fase, a pesar de la vulnerabilidad ante los tipos de peligros que he planteado en los capítulos anteriores. Esto no requiere que la Tierra no se vea nunca afectada por una catástrofe terminal, solo que, antes de que tal cosa ocurra, algunos humanos o artefactos se hayan dispersado más allá de su planeta original.

Tal como he destacado, sabemos demasiado poco acerca de cómo surgió la vida como para poder decir si es probable o no una inteligencia extraterrestre. El cosmos podría bullir con variedades de vida compleja; si así fuera, podríamos aspirar a ser miembros menores de un «club galáctico». Por otra parte, la aparición de inteligencia puede requerir una cadena de

acontecimientos tan rara (como ganar una lotería) que no haya ocurrido en ningún otro lugar. Esto decepcionaría a los que buscan extraterrestres, pero implicaría que nuestra Tierra podría ser el lugar más importante de la galaxia, y que su futuro tiene consecuencias cósmicas.

Es evidente que sería un descubrimiento trascendental detectar cualquier «señal» cósmica que fuera manifiestamente artificial: «bips» de radio o destellos de luz procedentes de algún láser celeste que examinara la Tierra. Las búsquedas de inteligencia extraterrestre (SETI, por sus siglas en inglés: Search for Extraterrestrial Intelligence) valen la pena, aunque las probabilidades parezcan estar en contra del éxito, porque lo que nos jugamos es muchísimo. Las búsquedas iniciales, que llevaron a cabo Frank Drake, Carl Sagan, Nikolai Kardashev y otros, no encontraron nada artificial. Pero eran muy limitadas: es como afirmar que no existe vida en los océanos después de examinar un vaso lleno de agua de mar. Esta es la razón por la que debemos ver con buenos ojos el lanzamiento de Breakthrough Listen<sup>[56]</sup>, una apuesta decidida que ha hecho Yuri Milner, un inversor ruso, para comprar tiempo en los mejores radiotelescopios del mundo y desarrollar instrumentos para escudriñar el cielo de una manera más general y continuada que antes. La búsqueda abarcará una amplia gama de frecuencias de radio y de microondas, mediante el uso de equipo de procesamiento de señales especialmente diseñado. Y será complementada por «destellos» de luz visible o de rayos X que no parecen tener un origen natural. Además, la aparición de las redes sociales y de la ciencia ciudadana permitirá que una comunidad mundial de entusiastas descargue los datos y participe en esta búsqueda cósmica.

En la cultura popular, se representa a los extraterrestres como vagamente humanoides: generalmente con dos piernas, aunque quizá con tentáculos, o con ojos sobre pedúnculos. Quizá tales criaturas existan. Pero no son el tipo de extraterrestre que es más probable que detectemos. Quisiera sostener enérgicamente que una transmisión de extraterrestres, si acaso la halláramos, procedería con mucha mayor probabilidad de cerebros electrónicos inmensamente intrincados y potentes. Infiero esto a partir de lo que ha ocurrido en la Tierra y (más importante todavía) de cómo cabe esperar que la vida y la inteligencia evolucionen en el futuro lejano. Los primeros organismos minúsculos aparecieron cuando la Tierra era joven, hace cerca de cuatro mil millones de años; esta biosfera primordial evolucionó hasta la red de la vida actual, maravillosamente compleja, de la que los humanos formamos parte. Pero los humanos no son el final de este proceso; de hecho, puede que no sean siquiera la fase intermedia. De modo que la evolución

futura (la era poshumana, en la que los organismos dominantes no son de carne y hueso) podría extenderse hacia el futuro a lo largo de miles de millones de años.

Supongamos que hay otros muchos planetas en los que empezó la vida, y que en algunos de ellos la evolución darwiniana siguió una trayectoria parecida a lo que ocurrió aquí. Incluso en este caso, es muy improbable que las fases clave estuvieran sincronizadas. Si la aparición de la inteligencia y la tecnología en un planeta se demoró mucho en relación con lo que ocurrió en la Tierra (porque el planeta es más joven, o debido a que ha sido necesario más tiempo para salvar los «cuellos de botella»), entonces dicho planeta no revelaría prueba alguna de vida extraterrestre. Pero alrededor de una estrella más antigua que el Sol, la vida pudo haber tenido un inicio anterior, de mil millones de años o más.

La historia de la civilización tecnológica humana se mide en milenios (como mucho), y quizá sea cuestión de uno o dos siglos más antes de que los humanos sean sustituidos o superados por la inteligencia inorgánica, que entonces persistirá, al tiempo que continuará evolucionando, durante miles de millones de años. Si la inteligencia «orgánica» de nivel humano es, genéricamente, solo un breve interludio antes de que las máquinas tomen el poder, es muy poco probable que «captemos» inteligencia extraterrestre en la breve fracción de tiempo en que todavía estaba en forma orgánica. Si acaso detectáramos extraterrestres, sería mucho más probable que fueran electrónicos.

Pero aun en el caso de que la búsqueda tuviera éxito, seguiría siendo improbable que la «señal» fuera un mensaje descifrado. Con más probabilidad representaría un subproducto (o incluso un mal funcionamiento) de alguna máquina supercompleja muy alejada de nuestra comprensión y que podría hacer remontar su ascendencia hasta seres orgánicos extraterrestres (que podrían existir todavía en su planeta original o podrían haberse extinguido mucho tiempo atrás). El único tipo de inteligencia cuyos mensajes podríamos descifrar sería el subconjunto (quizá reducido) que usara una tecnología en sintonía con nuestros mismos conceptos provincianos. Así pues, ¿podríamos distinguir si una señal está destinada a ser un mensaje o es solo alguna «fuga»? ¿Podríamos desarrollar una comunicación?

El filósofo Ludwig Wittgenstein dijo: «Si un león pudiera hablar, no lo entenderíamos». ¿Sería insuperable la «brecha cultural» con los extraterrestres? No creo que lo fuera necesariamente. Después de todo, si consiguieran comunicarse, compartirían con nosotros una comprensión de la

física, las matemáticas y la astronomía. Quizá provengan del planeta Zog y tengan siete tentáculos; pueden ser metálicos y electrónicos. Pero estarían hechos de átomos similares a los nuestros; si tuvieran ojos contemplarían el mismo cosmos y harían remontar su origen al mismo inicio caliente y denso: la «gran explosión», hace unos 13 800 millones de años. Pero no hay esperanza alguna de poder establecer una conversación rápida: si existen, estarían tan lejos que el intercambio de mensajes llevaría décadas, o incluso siglos.

Incluso si la inteligencia estuviera muy extendida en el cosmos, quizá solo podríamos reconocer una fracción pequeña y atípica de la misma. Algunos «cerebros» pueden empaquetar la realidad de una manera que quizá no podamos concebir. Otros podrían vivir vidas contemplativas que conservaran la energía, sin hacer nada que revelara su presencia. Tiene sentido centrar la búsqueda primero en planetas de tipo terrestre en órbita alrededor de estrellas longevas. Pero los autores de ciencia ficción nos recuerdan que existen alternativas más exóticas. En particular, la costumbre de referirse a una «civilización extraterrestre» puede ser demasiado restrictiva. Una «civilización» connota una sociedad de individuos; en cambio, los extraterrestres podrían ser una única inteligencia integrada. Incluso si se transmitieran señales, podríamos no reconocerlas como artificiales porque quizá no supiéramos cómo descodificarlas. A un ingeniero de radio veterano, familiarizado solo con la modulación de amplitud, le costaría mucho descifrar las comunicaciones inalámbricas modernas. De hecho, las técnicas de compresión pretenden que las señales estén tan cerca del ruido como sea posible: en tanto que una señal es predecible, hay margen para más compresión.

La atención se ha dirigido a la parte de radio del espectro. Pero, desde luego, en nuestro estado de ignorancia sobre qué podría haber ahí fuera, debemos explorar todas las bandas de frecuencia; hemos de mirar en la banda óptica y en la de rayos X, y también estar alerta ante otra evidencia de fenómenos o actividades no naturales. Se podrían buscar pruebas de moléculas creadas artificialmente, como los CFC en la atmósfera de un exoplaneta, o también artefactos voluminosos, como una esfera de Dyson. (Esta idea, debida a Freeman Dyson, imagina que una civilización derrochadora de energía podría aprovechar toda la energía de su estrella madre rodeándola con células fotovoltaicas, y que el «calor sobrante» aparecería como una emisión en infrarrojo). Y vale la pena buscar artefactos en el seno de nuestro sistema solar; quizá podamos descartar la visita de

extraterrestres a escala humana, pero si una civilización extraterrestre ha dominado la nanotecnología y ha transferido su inteligencia a máquinas, la «invasión» podría consistir en un enjambre de sondas microscópicas que nos habría pasado por alto. Merece la pena incluso mantener el ojo avizor para objetos especialmente brillantes o de formas extrañas que acechen entre los asteroides. Pero, desde luego, sería más fácil enviar una señal de radio o de láser que atravesar las distancias sobrecogedoras del espacio interestelar.

No creo que incluso los buscadores de SETI más optimistas consideren que la probabilidad de éxito sea superior a un porcentaje reducido... y la mayoría de nosotros somos más pesimistas. Pero es tan fascinante que la apuesta parece valer la pena; a todos nos gustaría ver que la búsqueda se inicia durante nuestra vida. Y hay dos máximas familiares que pertenecen a esta búsqueda: «Las afirmaciones extraordinarias requieren pruebas extraordinarias», y «La ausencia de prueba no es prueba de ausencia».

Asimismo, hemos de ser conscientes de lo muy sorprendentes que pueden ser algunos fenómenos naturales. Por ejemplo, en 1967, unos astrónomos de Cambridge descubrieron «bips» de radio regulares que se repetían varias veces por segundo. ¿Podría haber sido una transmisión extraterrestre? Algunos estaban dispuestos a aceptar esta opción, pero pronto resultó evidente que estos bips procedían de un tipo de objeto muy denso que hasta entonces no se había detectado: estrellas de neutrones, que tienen solo unos pocos kilómetros de diámetro y giran a varias revoluciones por segundo (a veces varios cientos), y envían un «haz de faro» de radiación hacia nosotros desde el espacio profundo. El estudio de las estrellas de neutrones (de las que ahora se conocen miles) ha resultado ser un tema especialmente emocionante y fructífero porque manifiesta una física extrema, en la que la naturaleza ha creado condiciones que nunca podríamos simular en el laboratorio<sup>[57]</sup>. Más recientemente, se ha descubierto una clase nueva y todavía desconcertante de «ráfagas de radio», que emiten con una potencia mayor que la de los púlsares<sup>[58]</sup>, pero la tendencia general es buscar explicaciones naturales para ellas.

El SETI depende de la filantropía privada. El fracaso en obtener fondos públicos me sorprende. Si yo estuviera ante un comité del gobierno, me sentiría menos vulnerable y más cómodo defendiendo un proyecto de SETI que buscando fondos para un acelerador de partículas nuevo y enorme. Ello es debido a que muchos miles de los que ven películas del género de *La guerra de las galaxias* serían felices si parte de los impuestos que generan se destinaran al SETI.

Quizá algún día encontremos evidencias de inteligencia extraterrestre; o incluso (aunque esto es menos probable) nos «enchufemos» a alguna mente cósmica. Por otra parte, nuestra Tierra puede ser única y la búsqueda puede fracasar. Esto decepcionaría a los buscadores. Pero tendría un aspecto positivo para la repercusión a largo plazo de la humanidad. Nuestro sistema solar apenas se halla en la mitad de su vida, y si los humanos evitan la autodestrucción durante el próximo siglo, la era poshumana nos aguarda. La inteligencia procedente de la Tierra podrá extenderse por toda la galaxia, y evolucionar en una complejidad rebosante mucho más allá de lo que podamos siquiera concebir. Si es así, nuestro minúsculo planeta, este punto azul pálido que flota en el espacio, podría ser el lugar más importante de todo el cosmos.

Sea como sea, nuestro hábitat cósmico, este inmenso firmamento de estrellas y galaxias, parece «diseñado» o «sintonizado» para ser una morada para la vida. A partir de una simple gran explosión, se ha desarrollado una complejidad asombrosa que ha conducido a nuestra aparición. Incluso si ahora estamos solos en el universo, quizá no seamos la culminación de esta «marcha» hacia la complejidad y la consciencia. Esto nos dice algo muy profundo acerca de las leyes de la naturaleza, y motiva una breve excursión, en los capítulos siguientes, hasta los horizontes más amplios en el tiempo y en el espacio concebidos por los cosmólogos.



# 4

## LOS LÍMITES Y EL FUTURO DE LA CIENCIA

### DE LO SIMPLE A LO COMPLEJO

Una especulación inventada: suponga el lector que una «máquina del tiempo» nos permitiera enviar un sucinto «tuit» a grandes científicos del pasado: Newton o Arquímedes, por ejemplo. ¿Qué mensaje les pondría más al corriente y transformaría su visión del mundo? Creo que sería la maravillosa noticia de que nosotros, y todo lo que hay en el mundo cotidiano, estamos hechos de menos de cien diferentes tipos de átomos: grandes cantidades de hidrógeno, oxígeno y carbono; mezclas pequeñas pero fundamentales de hierro, fósforo y otros elementos. Todos los materiales, vivos y no vivos, deben su estructura a los intrincados patrones en los que los átomos se unen entre sí, y a cómo reaccionan. Toda la química está determinada por las interacciones entre los núcleos de los átomos, cargados positivamente, y el enjambre de electrones cargados negativamente en los que aquellos están incrustados.

Los átomos son simples; podemos escribir las ecuaciones de la mecánica cuántica (la ecuación de Schrödinger) que describen sus propiedades. También, a escala cósmica, lo son los agujeros negros, para los que podemos resolver las ecuaciones de Einstein. Estas cuestiones «básicas» se comprenden lo bastante bien para permitir a los ingenieros diseñar todos los objetos del mundo moderno. (La teoría de la relatividad general de Einstein ha encontrado un uso práctico en los satélites GPS; sus relojes perderían precisión si no estuvieran corregidos adecuadamente para los efectos de la gravedad).

La intrincada estructura de todos los seres vivos asevera que capa sobre capa de complejidad puede surgir de la aplicación de leyes subyacentes. Los juegos matemáticos pueden ayudar a desarrollar nuestro conocimiento de cómo reglas sencillas, reiteradas una y otra vez, pueden tener realmente consecuencias sorprendentemente complejas.

John Conway, en la actualidad en la Universidad de Princeton, es uno de los matemáticos más carismáticos<sup>[59]</sup>. Cuando enseñaba en Cambridge, los

estudiantes crearon una «sociedad de agradecimiento a Conway». Su investigación académica trata de una rama de las matemáticas conocida como teoría de grupos. Pero alcanzó una audiencia más amplia y consiguió un mayor impacto intelectual al desarrollar el Juego de la Vida<sup>[60]</sup>.

En 1970, Conway experimentaba con pautas en un tablero de go; quería diseñar un juego que se iniciara con un patrón simple y que empleara reglas básicas que se repitieran una y otra vez. Descubrió que, ajustando las reglas de su juego y los patrones iniciales, algunas disposiciones producen resultados increíblemente complicados, surgidos en apariencia de la nada, porque las reglas del juego son muy básicas. Aparecieron «bichos», que se movían por el tablero y que parecían tener vida propia. Las reglas simples especifican solo cuándo un cuadro blanco se convierte en un cuadro negro (y viceversa), pero al aplicarse una y otra vez se crea una fascinante variedad de patrones complicados. Los aficionados a este juego identificaron objetos tales como «planeador», «pistola planeador» y otros patrones que se reproducían.

Conway se entregó a muchas sesiones de «prueba y error» antes de dar con un «mundo virtual» sencillo que permitía una interesante variedad emergente. Utilizaba lápiz y papel, en los días anteriores a los ordenadores personales, pero las implicaciones del Juego de la Vida no aparecieron hasta que pudo utilizarse la mayor velocidad de los ordenadores. Asimismo, los primeros ordenadores personales permitieron que Benoît Mandelbrot y otros trazaran los maravillosos patrones de los fractales, lo que demostraba que unas fórmulas matemáticas sencillas pueden codificar una complejidad intrincada aparente.

La mayoría de los científicos comparte la perplejidad expresada en un ensayo clásico del físico Eugene Wigner, titulado *Unreasonable effectiveness of mathematics in the natural sciences* («La irrazonable efectividad de las matemáticas en las ciencias naturales»<sup>[61]</sup>). Y también con la máxima de Einstein de que «lo que es más incomprensible acerca del universo es que sea comprensible». Nos maravillamos de que el mundo físico no sea anárquico, de que los átomos obedezcan las mismas leyes en galaxias distantes y en nuestros laboratorios. Como ya he indicado (en el quinto apartado del capítulo 3), si alguna vez descubrimos extraterrestres y queremos comunicarnos con ellos, las matemáticas, la física y la astronomía serían quizá la única cultura compartida. Las matemáticas son el lenguaje de la ciencia, y lo han sido desde que los babilonios inventaron su calendario y predijeron eclipses. (Algunos de nosotros consideraríamos asimismo la música como el lenguaje de la religión).

Paul Dirac, uno de los pioneros de la teoría cuántica, demostró que la lógica interna de las matemáticas puede señalar el camino hacia nuevos descubrimientos. Dirac afirmaba que «el método más potente de avance es emplear todos los recursos de las matemáticas puras en intentos de perfeccionar y generalizar el formalismo matemático que constituye la base existente de la física teórica, y (después de cada éxito en esta dirección) intentar interpretar las nuevas características matemáticas en términos de entidades físicas»<sup>[62]</sup>. Fue este enfoque (seguir a las matemáticas hasta donde nos lleven) el que condujo a Dirac a la idea de antimateria: los «antielectrones», que ahora se conocen como positrones, se descubrieron solo unos pocos años después de que Dirac formulara una ecuación que habría parecido fea sin ellos.

Los teóricos actuales, con los mismos motivos que Dirac, esperan comprender la realidad a un nivel más profundo mediante la exploración de conceptos tales como la teoría de cuerdas, que implican escalas mucho más pequeñas que cualquiera de las que podemos investigar directamente. Asimismo, en el otro extremo, algunos exploran teorías cosmológicas que ofrecen indicios de que el universo es muchísimo más extenso que el «retazo» que podemos observar con nuestros telescopios (véase el tercer apartado del capítulo 4).

Todas las estructuras del universo están compuestas de «piezas básicas» regidas por leyes matemáticas. Sin embargo, por lo general las estructuras suelen ser demasiado complicadas para que incluso los ordenadores más potentes puedan calcularlas. Pero quizá en el futuro muy distante, la inteligencia poshumana (no en forma orgánica, sino en objetos que evolucionen autónomamente) desarrollará hiperordenadores con la potencia de procesamiento para simular seres vivos, incluso mundos enteros. Quizá seres avanzados podrían emplear hiperordenadores para simular un universo que no es meramente pautas en un tablero de ajedrez (como el juego de Conway) o incluso como los mejores «efectos especiales» en las películas o los juegos de ordenador. Suponga el lector que dichos seres puedan simular un universo por entero tan complejo como aquel en el que nosotros percibimos que estamos. Entonces surge un pensamiento desconcertante (aunque sea una especulación total): ¿quizá esto es lo que somos realmente!

## **DAR SENTIDO A NUESTRO MUNDO COMPLEJO**

Posibilidades que antaño se hallaban en el ámbito de la ciencia ficción han pasado a ser objeto de debate científico serio. Desde los primeros momentos del Big Bang hasta las posibilidades de vida extraterrestre, los científicos se ven conducidos a mundos más raros incluso que los que imaginan la mayoría de los escritores de ficción. A primera vista se podría pensar que es presuntuoso afirmar que se entiende el cosmos remoto (o incluso que se intenta hacerlo), cuando hay tantas cosas que nos desconciertan mucho más cerca. Pero esto no es necesariamente una evaluación justa. No hay nada paradójico en que el conjunto sea más sencillo que sus partes. Imagine el lector un ladrillo ordinario; su forma puede describirse con unos pocos números. Pero si lo desmenuzamos, los fragmentos no pueden describirse de manera tan sucinta.

El progreso científico parece desigual. Por raro que pueda parecer, algunos de los fenómenos que mejor se comprenden se hallan muy lejos en el cosmos. Incluso en el siglo XVII, Newton pudo describir el «mecanismo de los cielos»; los eclipses podían entenderse y predecirse. Pero hay muy pocas cosas que sean tan predecibles, aunque las entendamos. Por ejemplo, es difícil pronosticar, incluso un día antes, si los que viajan para contemplar un eclipse se encontrarán con nubes o con un cielo despejado. De hecho, en la mayoría de los contextos, existe un límite fundamental a la distancia temporal futura en que podemos predecir algo. Ello se debe a que unas contingencias minúsculas (como si una mariposa bate o no sus alas) tienen consecuencias que aumentan de forma exponencial. Por razones como estas, incluso el cómputo más detallado no puede prever normalmente el tiempo que hará en Gran Bretaña incluso dentro de unos pocos días. (Sin embargo, y esto es importante, ello no impide las predicciones a largo plazo del cambio climático, ni debilita nuestra confianza en que el próximo enero hará más frío que en julio).

En la actualidad, los astrónomos pueden atribuir de manera convincente minúsculas vibraciones en un detector de ondas gravitatorias a un «choque» entre dos agujeros negros situados a más de mil millones de años luz de la Tierra<sup>[63]</sup>. En cambio, nuestra comprensión de algunas cuestiones familiares que nos interesan a todos (la dieta y el cuidado de los niños, por ejemplo) es tan exigua que el consejo de los «expertos» cambia de un año para otro. Cuando yo era joven, se pensaba que la leche y los huevos eran buenos; una década después se consideraban peligrosos debido a su elevado contenido en colesterol; y ahora parece que, de nuevo, se los considera inocuos. De modo que los amantes del chocolate y del queso no tendrán que esperar mucho antes

de que se les diga que estos alimentos son buenos para ellos. Y sigue sin haber cura para muchas de las enfermedades más comunes.

Pero, en realidad, no resulta paradójico que hayamos conseguido una comprensión segura de fenómenos cósmicos arcanos y remotos, mientras que hay cosas cotidianas que nos desconciertan. Ello se debe a que la astronomía trata de fenómenos mucho menos complejos que las ciencias biológicas y humanas (incluso que las ciencias medioambientales «locales»).

Así pues, ¿cómo hemos de definir o de medir la complejidad? Una definición formal la sugirió el matemático ruso Andréi Kolmogórov: la complejidad de un objeto depende de la longitud del programa informático más corto que pueda generar una descripción completa de él.

Algo hecho de solo unos pocos átomos no puede ser muy complicado. Las cosas grandes tampoco tienen por qué ser complejas. Consideremos, por ejemplo, un cristal: incluso si fuera grande no se diría que es complejo. La receta para (por ejemplo) un cristal de sal es corta: tómense átomos de sodio y cloro y júntense, una y otra vez, para hacer un entramado cúbico. Y al revés: si tomamos un cristal grande y lo hacemos añicos, hay poco cambio hasta que se rompe a la escala atómica. A pesar de su enormidad, una estrella es también bastante simple. Su núcleo es tan caliente que allí no pueden existir moléculas químicas (las moléculas complejas se hacen trizas); es básicamente un gas amorfo de núcleos atómicos y electrones. En realidad, los agujeros negros, aunque parecen exóticos, figuran entre las entidades más simples de la naturaleza. Pueden describirse de manera precisa mediante ecuaciones que no son más complicadas que las que describen un único átomo.

Nuestros objetos de alta tecnología son complejos. Por ejemplo, un chip de silicio con mil millones de transistores tiene una estructura a todos los niveles hasta el de unos pocos átomos. Pero los más complejos de todos son los seres vivos. Un animal tiene una estructura interna interconectada a varias escalas distintas: desde las proteínas en células individuales hasta las extremidades y los órganos principales. No conserva su esencia si se le trocea. Muere. Los humanos son más complejos que los átomos o las estrellas (e, incidentalmente, a medio camino entre ellos en cuanto a masa; hacen falta tantos cuerpos humanos para constituir el Sol como átomos hay en cada uno de nosotros). La receta genética para un ser humano está codificada en tres mil millones de eslabones de ADN. Pero no estamos totalmente determinados por nuestros genes; estamos moldeados por nuestro ambiente y nuestras

experiencias. La cosa más compleja que conocemos del universo es nuestro propio cerebro. Pensamientos y recuerdos (codificados por las neuronas en el cerebro) son mucho más variados que los genes.

Sin embargo, hay una diferencia importante entre la «complejidad de Kolmogórov» y si algo parece realmente complicado. Por ejemplo, el Juego de la Vida de Conway conduce a estructuras de aspecto complicado. Pero todas ellas pueden describirse mediante un programa corto: tomemos una determinada posición de partida y después repitamos, una y otra vez, según las reglas simples del juego. El intrincado patrón fractal del conjunto de Mandelbrot es asimismo el resultado de un algoritmo simple. Pero esto son excepciones. La mayoría de las cosas en nuestro entorno cotidiano son demasiado complicadas para predecirlas, o incluso para describirlas completamente en detalle. Pero, no obstante, gran parte de su esencia puede captarse por unas pocas intuiciones clave. El concepto de deriva continental (tectónica de placas) nos ayuda a encajar un montón entero de patrones geológicos y ecológicos en todo el globo. La intuición de Darwin (la evolución mediante selección natural) revela la unidad global de toda la red de vida en este planeta. Y la doble hélice de ADN revela la base universal de la herencia. En la naturaleza existen patrones. Incluso hay patrones en la manera en que los humanos nos comportamos: en cómo crecen las ciudades, cómo se difunden las epidemias y cómo se desarrollan tecnologías como los chips de ordenadores. Cuanto más entendemos el mundo, menos desconcertante resulta y más capaces somos de cambiarlo.

Las ciencias pueden considerarse como una jerarquía, ordenada como los pisos de un edificio, con los que tratan con sistemas más complejos situados arriba: la física de partículas en el sótano, después el resto de la física, después la química, a continuación la biología celular, después la botánica y la zoología y a continuación las ciencias del comportamiento y humanas (con los economistas adjudicándose el ático).

La «ordenación» de las ciencias en esta jerarquía no es polémica. Pero lo que es más debatible es el sentido en el que las «ciencias de la planta baja», en particular la física de partículas, son más profundas o más fundamentales que las otras. En cierto sentido lo son realmente. Tal como ha señalado el físico Steven Weinberg: «Todas las flechas señalan hacia abajo». Dicho de otro modo, si vamos preguntando: ¿por qué?, ¿por qué?, ¿por qué?, terminaremos en el nivel de las partículas. Casi todos los científicos son reduccionistas en el sentido de Weinberg: están seguros de que todo, por complejo que sea, es una solución de la ecuación de Schrödinger (a diferencia

de los «vitalistas» de épocas anteriores, que creían que los seres vivos estaban imbuidos de alguna «esencia» especial). Pero este reduccionismo no es útil desde el punto de vista conceptual. Tal como destacó otro gran físico, Philip Anderson, «más es diferente»; los sistemas macroscópicos que contienen un gran número de partículas manifiestan propiedades «emergentes» y se comprenden mejor en términos de conceptos nuevos apropiados para el nivel del sistema.

Incluso un fenómeno tan poco misterioso como el flujo de agua en tuberías o ríos se entiende en términos de conceptos «emergentes» como viscosidad y turbulencia. A los especialistas en mecánica de fluidos no les importa que el agua esté constituida realmente de moléculas de  $H_2O$ ; ven el agua como un continuo. Incluso si tuvieran un hiperordenador que pudiera resolver la ecuación de Schrödinger para el flujo, átomo a átomo, la simulación resultante no proporcionaría ningún atisbo de cómo rompen las olas, o de qué hace que un flujo se torne turbulento. Y los conceptos nuevos e irreducibles son aún más cruciales para que podamos comprender fenómenos realmente complicados; por ejemplo, las aves migratorias o el cerebro humano. Los fenómenos a diferentes niveles de la jerarquía se entienden en términos de conceptos diferentes: turbulencia, supervivencia, estado de alerta, etc. El cerebro es un conjunto de células; un cuadro es un conjunto de pigmentos. Pero lo que es importante e interesante es el patrón y la estructura: la complejidad emergente.

Esta es la razón por la que la analogía con el edificio es inadecuada. Toda la estructura de un edificio está en peligro si los cimientos son débiles. En cambio, las ciencias de «nivel superior» que tratan de sistemas complejos no son vulnerables por una base insegura, como lo es un edificio. Cada ciencia tiene sus propios conceptos y modos de explicación distintos. El reduccionismo es cierto en un sentido. Pero rara vez es cierto en un sentido útil. Solo alrededor de un 1 % de los científicos son físicos de partículas o cosmólogos. Los del 99 % restante trabajan en niveles «superiores» de la jerarquía. Lo que les supone un reto es la complejidad de su tema, no ninguna deficiencia en nuestra comprensión de la física subnuclear.

## **¿CUÁN LEJOS SE EXTIENDE LA REALIDAD FÍSICA?**

El Sol se formó hace 4500 millones de años, pero le quedan unos 6000 millones de años más hasta que su combustible se agote. Entonces estallará y

envolverá a los planetas interiores. Y el universo en expansión continuará, quizá para siempre, destinado a ser cada vez más frío, cada vez más vacío. Citando a Woody Allen: «la eternidad es muy larga, especialmente hacia el final».

Cualquier organismo que presenciara la desaparición del Sol no sería humano; sería tan diferente de nosotros como nosotros lo somos de una chinche. La evolución poshumana, aquí en la Tierra y mucho más allá, podría ser tan prolongada como la evolución darwiniana que ha conducido hasta nosotros... e incluso más maravillosa. Y ahora la evolución se está acelerando; puede ocurrir mediante «diseño inteligente» a una escala espaciotemporal tecnológica, que operara con mayor velocidad que la selección natural y fuera impulsada por avances en genética y en inteligencia artificial (IA). El futuro a largo plazo reside probablemente en la «vida» electrónica en lugar de en la orgánica (véase el tercer apartado del capítulo 3).

En términos cosmológicos (o, de hecho, en un marco temporal darwiniano), un milenio no es más que un instante. De modo que «aceleremos hacia delante» no unos cuantos siglos, ni siquiera unos pocos milenios, sino a lo largo de una escala temporal «astronómica» millones de veces más extensa que esto. La «ecología» de los nacimientos y muertes estelares en nuestra galaxia se producirá más lentamente de manera gradual, hasta que llegue la sacudida del «choque ambiental» de un impacto con la galaxia de Andrómeda, quizá dentro de cuatro mil millones de años. Los restos de nuestra galaxia, de Andrómeda, y de sus compañeros más pequeños (que ahora constituyen lo que se denomina el Grupo Local) se agregarán a partir de ahí en un enjambre amorfo de estrellas.

A escala cósmica, una fuerza misteriosa latente en el espacio vacío vence la atracción gravitatoria y separa a las galaxias unas de otras. Las galaxias aceleran y desaparecen sobre un horizonte, algo parecido a una versión invertida de lo que ocurre cuando algo cae dentro de un agujero negro. Todo lo que quedará a la vista pasados cien mil millones de años serán las estrellas muertas y moribundas de nuestro Grupo Local. Pero estas podrán continuar durante billones de años, que es quizá el tiempo suficiente para la tendencia a largo plazo de los sistemas vivos para ganar complejidad y «entropía negativa» hasta alcanzar una culminación. Todos los átomos que antaño estaban en estrellas y gas podrían transformarse en estructuras tan intrincadas como un organismo vivo o un chip de silicio... pero a una escala cósmica. Ante el fondo paulatinamente oscuro, los protones pueden



desintegrarse, las partículas de materia oscura aniquilarse, habrá destellos ocasionales cuando los agujeros negros se evaporen... y después silencio.

En 1979, Freeman Dyson (del que ya se ha hecho mención en el primer apartado del capítulo 2) publicó un artículo, ahora ya clásico, cuyo objetivo era «establecer límites numéricos dentro de los cuales debe situarse el destino del universo»<sup>[64]</sup>. Incluso si todo el material se convirtiese de manera óptima en un ordenador o una superinteligencia, ¿habría todavía límites para cuánta información podría procesarse? ¿Podría pensarse un número ilimitado de pensamientos? La respuesta depende de la cosmología. Para hacer cálculos a temperaturas bajas hace falta menos energía. Para el universo en el que parece que nos hallamos, el límite de Dyson sería finito, pero podría maximizarse si los «pensadores» permanecieran fríos y pensarán lentamente.

Nuestro conocimiento del espacio y del tiempo es incompleto. La relatividad de Einstein (que describe la gravedad y el cosmos) y el principio cuántico (fundamental para comprender la escala atómica) son los dos pilares de la física del siglo XX, pero aún no se ha ultimado la teoría que los unifica. Las ideas actuales sugieren que el progreso dependerá de comprender totalmente la entidad que podría parecer la más simple de todas: el «mero» espacio vacío (el vacío) es el escenario de todo lo que ocurre; puede que tenga una textura rica, pero a escalas un cuatrillón de veces más pequeñas que un átomo. Según la teoría de cuerdas, si se viera con este aumento, cada «punto» en el espacio ordinario podría revelarse como un origami fuertemente plegado en varias dimensiones adicionales.

Las mismas leyes fundamentales son de aplicación a todo el ámbito que podemos supervisar con telescopios. Si no fuera así (si los átomos fueran «anárquicos» en su comportamiento) no habríamos hecho ningún progreso en la comprensión del universo observable. Pero este ámbito observable puede no ser toda la realidad física; algunos cosmólogos especulan que «nuestro» Big Bang no fue el único: que la realidad física es lo bastante grande para abarcar un «multiverso» entero.

Solo podemos ver un volumen finito: un número finito de galaxias. Ello se debe esencialmente a que existe un horizonte, una cáscara que nos rodea, que delinea la mayor distancia desde la cual la luz puede alcanzarnos. Pero esta cáscara no tiene más significado físico que el círculo que delinea nuestro horizonte si nos hallamos en medio del océano. Incluso los astrónomos conservadores están seguros de que el volumen de espaciotiempo que se halla al alcance de nuestros telescopios (lo que los astrónomos han denominado tradicionalmente «el universo») es solo una fracción minúscula del resultado

del Big Bang. Cabría esperar muchas más galaxias situadas más allá del horizonte, inobservables, cada una de las cuales (junto con las inteligencias que pueda albergar) evolucionará de manera parecida a la nuestra.

Una idea familiar es que, si a suficientes monos se les concediera el tiempo suficiente, podrían escribir las obras de Shakespeare (y, de hecho, todos los demás libros, junto con cada línea concebible de galimatías). Esta afirmación es correcta desde el punto de vista matemático. Pero el número de «fracasos» que precedería a un éxito eventual es un número con unos diez millones de dígitos. Incluso el número de átomos en el universo visible tiene solo ochenta dígitos. Si todos los planetas de nuestra galaxia estuvieran repletos de monos, que hubieran estado escribiendo desde que los primeros planetas se formaron, entonces lo mejor que habrían hecho sería mecanografiar un único soneto (su resultado incluiría cortos fragmentos coherentes de todas las literaturas del mundo, pero ni una sola obra completa). Producir un conjunto específico de letras tan extenso como un libro es tan inmensamente improbable que no habría aparecido ni una sola vez en el seno del universo observable. Cuando lanzamos los dados podemos obtener al final una larga sucesión de seises, pero (a menos que los dados estén trucados) no esperaríamos obtener más de cien seises seguidos aunque estuviéramos jugando durante mil millones de años.

Sin embargo, si el universo se extiende lo bastante lejos, todo puede ocurrir: en algún lugar situado mucho más allá de nuestro horizonte podría haber incluso una réplica de la Tierra. Esto requiere que el espacio sea MUY grande: descrito por un número no simplemente con un millón de dígitos, sino con 10 elevado a 100 dígitos: un uno seguido de cien ceros. Diez elevado a 100 se llama gúgol, y un número con un gúgol de ceros es un gúgolplex.

Dados el espacio y el tiempo suficientes, todas las cadenas de acontecimientos concebibles podrían producirse en algún lugar, aunque casi todas ellas ocurrirían mucho más lejos de la gama de observaciones que podríamos hacer de manera imaginable. Las opciones combinatorias podrían abarcar réplicas de nosotros, haciendo todas las elecciones posibles. Cuandoquiera que tenga que hacerse una elección, una de las réplicas tomará cada opción. Podemos tener la sensación de que una elección que hagamos está determinada. Pero puede ser un consuelo el que, en algún lugar muy lejano (mucho más allá del horizonte de nuestras observaciones) tengamos un avatar que ha hecho la elección opuesta.

Todo esto puede incluirse en el resultado de nuestro Big Bang, que podría extenderse sobre un volumen enorme. Pero esto no es todo. Lo que

tradicionalmente hemos denominado «el universo» (el resultado de «nuestra» gran explosión) puede que solo sea una isla, solo un pedazo de espacio y tiempo, en un archipiélago quizás infinito. Pudo haber habido muchas grandes explosiones, no solo una. Cada constituyente de este «multiverso» podría haberse enfriado de manera diferente, y quizá terminar siendo regido por leyes distintas. De la misma manera que la Tierra es un planeta muy especial entre tropecientos millones de otros, así (en una escala mucho más grandiosa) nuestro Big Bang podría haber sido muy especial. En esta perspectiva cósmica enormemente expandida, las leyes de Einstein y del cuanto podrían ser meros reglamentos provincianos que rigieran nuestro pedazo cósmico. Así, no solo el espacio y el tiempo podrían ser intrincadamente «granulados» a una escala submicroscópica, sino que también, en el otro extremo (a escalas mucho mayores de las que los astrónomos pueden examinar), podrían tener una estructura tan intrincada como la fauna de un ecosistema rico. Nuestro concepto actual de la realidad física podría ser tan restringido, en relación con el todo, como la perspectiva de la Tierra de la que dispone un organismo del plancton, cuyo «universo» es una cucharada de agua.

¿Podría ser verdad esto? Un reto para la física del siglo XXI es dar respuesta a dos preguntas. Primera: ¿existen muchas «grandes explosiones» en lugar de solo una? Segunda (y esta es todavía más interesante): si hay muchas, ¿están todas regidas por la misma física?

Si nos hallamos en un multiverso, esto implicaría una cuarta revolución copernicana, y la mayor de todas; hemos tenido la propia revolución copernicana, después el darnos cuenta de que existen miles de millones de sistemas planetarios en nuestra galaxia; después, que existen miles de millones de galaxias en nuestro universo observable. Pero, ahora, eso no es todo. El panorama entero que los astrónomos pueden observar podría ser una parte minúscula del resultado de «nuestro» Big Bang, que es solo una explosión de entre quizá un conjunto infinito.

(A primera vista, el concepto de universos paralelos podría parecer demasiado esotérico para tener algún impacto práctico. Pero puede ofrecer realmente [en una de sus variantes] la perspectiva de un tipo completamente nuevo de ordenador: el ordenador cuántico, que puede trascender los límites incluso del procesador digital más rápido al compartir efectivamente la carga computacional entre una casi infinitud de universos paralelos).

Hace cincuenta años, no estábamos seguros de si había habido una gran explosión. Mi tutor en Cambridge, Fred Hoyle, por ejemplo, rechazaba el concepto, y prefería un cosmos en «estado estacionario» que era eterno e

invariable. (Nunca se convirtió del todo; en sus últimos años defendía una idea de compromiso que podía calificarse de «explosión estacionaria»). Ahora tenemos suficientes pruebas para delinear la historia cósmica y remontarnos al primer nanosegundo ultradenso, con tanta confianza como un geólogo que infiere la historia primitiva de la Tierra. De modo que, en cincuenta años más, no es excesivamente optimista esperar que tengamos una teoría física «unificada», corroborada por el experimento y la observación en el mundo cotidiano, que sea lo bastante amplia para describir lo que ocurrió en la primera cuatrillonésima de segundo, en que las densidades y las energías eran muy superiores a la gama en la que son de aplicación las teorías actuales. Si esta teoría futura hubiera de predecir múltiples grandes explosiones deberíamos tomarnos muy en serio dicha predicción, aunque no pueda verificarse directamente (de la misma manera que damos crédito a lo que la teoría de Einstein nos dice acerca de las entrañas inobservables de los agujeros negros, porque la teoría ha sobrevivido a muchas pruebas en ámbitos que podemos observar).

A finales de este siglo podremos preguntar si vivimos o no en un multiverso, y cuánta variedad exhiben sus «universos» constituyentes. La respuesta a esta pregunta determinará cómo hemos de interpretar el universo «bioamigable» en el que vivimos (compartiéndolo con cualesquiera extraterrestres con los que un día podamos entrar en contacto).

Mi libro de 1997, *Before the Beginning*<sup>[65]</sup>, especulaba acerca de un multiverso. Sus argumentos estaban motivados en parte por el carácter aparentemente «biofílico» y sintonizado de nuestro universo. Esto no ocasionaría ninguna sorpresa si la realidad física abarcara todo un conjunto de universos que «aprovecharan la ocasión» según las constantes y leyes básicas. La mayoría no habrían nacido todavía, o serían estériles, pero nos encontraríamos en uno de aquellos en los que las leyes permitieran la complejidad emergente. Esta idea había sido respaldada por la teoría de la «inflación cósmica» de la década de 1980, que ofrecía nuevas ideas acerca de cómo todo nuestro universo observable había «brotado» de un acontecimiento de tamaño microscópico. Obtuvo más atención seria cuando los teóricos de las cuerdas empezaron a defender la posibilidad de muchos vacíos diferentes, cada uno de ellos un escenario para microfísicas regidas por leyes diferentes.

Desde entonces he tenido una visión detallada de este cambio de opinión y de la aparición de estas ideas (ciertamente especulativas). En 2001 contribuí a organizar un congreso sobre este tema. Tuvo lugar en Cambridge, pero no en la universidad. Lo acogí en mi hogar, una granja en el límite de la ciudad,

en un establo reformado que ofrecía una sede algo austera para nuestras discusiones. Algunos años más tarde, tuvimos un segundo congreso. Esta vez la localización fue muy distinta: una sala relativamente grande del Trinity College, con un retrato de Newton (el alumno más famoso del College) detrás del estrado.

El teórico Frank Wilczek (famoso por su papel, cuando todavía era un estudiante, en la formulación de lo que se llama el «modelo estándar» de la física de partículas) asistió a ambos congresos. Cuando habló en el segundo, comparó la atmósfera de las dos reuniones.

Describió a los físicos de la primera reunión como voces «marginales» en el desierto que durante muchos años habían promovido argumentos extraños sobre conspiraciones entre constantes fundamentales y universos alternativos. Sus preocupaciones y enfoques parecían completamente ajenos al consenso de vanguardia de la física teórica, que estaba atareada construyendo con éxito un universo único y matemáticamente perfecto. Pero en esta segunda reunión advirtió que «la vanguardia se había marchado para unirse a los profetas en el desierto».

Hace algunos años, me encontraba yo en un comité de la Universidad de Stanford en el que el presidente nos pidió: «En la escala “se jugaría usted su pez de colores, su perro o su vida”, ¿cuán seguros están ustedes del concepto de multiverso?». Yo dije que me hallaba cerca del nivel del perro. Andrei Linde, un cosmólogo ruso que había pasado veinticinco años promoviendo una teoría de «inflación eterna», dijo que él casi apostaría su vida. Posteriormente, cuando se le explicó esto, el eminente teórico Steven Weinberg dijo que con mucho gusto se jugaría el perro de Martin Rees y la vida de Andrei Linde.

Andrei Linde, mi perro y yo moriremos antes de que esta cuestión se zanje. No se trata de metafísica. Es muy especulativo. Pero es ciencia apasionante. Y puede ser verdad.

## **¿ACASO LA CIENCIA «DARÁ UN FRENAZO»?**

Una característica de la ciencia es que a medida que se extienden las fronteras de nuestro saber, nuevos misterios, justo más allá de dichas fronteras, se hacen patentes. Los descubrimientos inesperados han sido emocionantes de forma perenne en mi propio ámbito de la astronomía. En cada tema habrá, en cada fase, «hechos desconocidos que desconocemos». (Se rieron de Donald

Rumsfeld<sup>[66]</sup> por decir esto en un contexto diferente; pero desde luego tenía razón, y habría sido mejor para el mundo si se hubiera convertido en filósofo). Pero hay una cuestión más profunda. ¿Existen cosas que nunca sabremos, porque se hallan más allá de la capacidad de la mente humana de entenderlas? ¿Está nuestro cerebro adaptado a comprender todas las características clave de la realidad?

Realmente, hemos de maravillarnos de cuánto hemos comprendido. La intuición humana evolucionó para habérselas con los fenómenos cotidianos que nuestros antepasados remotos encontraban en la sabana africana. Nuestro cerebro no ha cambiado mucho desde aquella época, de modo que es notable que pueda comprender el comportamiento contrario al sentido común del mundo cuántico y del cosmos. Previamente conjeturé que las respuestas a muchos misterios actuales resultarán patentes en las décadas venideras. Pero quizá no todas ellas; algunas características clave de la realidad pueden hallarse fuera de nuestra capacidad conceptual de comprenderlas. Quizá en algún momento nos detendremos de golpe; puede haber fenómenos, cruciales para nuestro destino a largo plazo y para una comprensión total de la realidad física, de los que no somos conscientes, de la misma manera que un mono no comprende la naturaleza de las estrellas y las galaxias. Si existen extraterrestres, algunos pueden tener un «cerebro» que estructure su consciencia de una manera que no podamos concebir y que tenga una percepción muy diferente de la realidad.

Ya tenemos la ayuda de la potencia de cálculo. En el «mundo virtual» del interior de un ordenador, los astrónomos pueden imitar la formación de una galaxia, o hacer chocar otro planeta con la Tierra para ver si así fue como se pudo haber formado la Luna; los meteorólogos pueden simular la atmósfera, para las previsiones del tiempo y para predecir tendencias climáticas a largo plazo; los neurocientíficos pueden simular cómo interactúan las neuronas. De la misma manera que los juegos de ordenador se hacen más complicados a medida que sus consolas son más potentes, a medida que aumenta la potencia de los ordenadores estos experimentos «virtuales» se hacen más realistas y útiles.

Además, no hay razones por las que los ordenadores no puedan hacer realmente descubrimientos que han eludido al cerebro humano sin ayuda. Por ejemplo, algunas sustancias son conductoras perfectas de la electricidad cuando se enfrían a temperaturas muy bajas (superconductoras). Existe una búsqueda continuada para encontrar la «receta» de un superconductor que funcione a temperatura ambiente normal (hasta ahora, la mayor temperatura

superconductor conseguida es de unos -135 grados Celsius a presiones normales y algo más elevada, unos -70 grados, para sulfuro de hidrógeno a una presión muy elevada). Esto permitiría transmisiones transcontinentales de electricidad sin pérdidas y trenes «maglev»<sup>[67]</sup> eficientes.

La búsqueda implica mucha «prueba y error». Pero se está haciendo posible calcular las propiedades de los materiales, y hacerlo tan rápidamente que se pueden computar millones de alternativas, mucho más rápidamente de lo que se pueden realizar los experimentos reales. Supongamos que una máquina diera con una receta única y con éxito. Podría haber ocurrido de la misma manera que AlphaGo. Pero habría alcanzado algo que le habría merecido un premio Nobel a un científico. Se habría comportado como si tuviera intuición e imaginación dentro de su universo relativamente especializado, de la misma manera que AlphaGo dejó impresionados y boquiabiertos a los campeones humanos con algunos de sus movimientos. Asimismo, la búsqueda de la composición química óptima para nuevas medicinas la harán cada vez más los ordenadores en lugar de experimentos reales, de la misma manera que durante muchos años los ingenieros aeronáuticos han simulado el flujo de aire sobre las alas mediante cálculos informáticos en lugar de depender de experimentos en túneles de viento.

Igualmente importante es la capacidad de discernir pequeñas tendencias o correlaciones al «triturar» enormes conjuntos de datos. Para tomar un ejemplo de la genética, cualidades como la inteligencia y la altura están determinadas por combinaciones de genes. Identificar dichas combinaciones requeriría una máquina lo suficientemente rápida para examinar grandes muestras de genomas a fin de identificar pequeñas correlaciones. Unos procedimientos similares los emplean los inversores financieros a la hora de buscar tendencias en los mercados y de responderlas con rapidez, de manera que sus clientes puedan obtener fondos a nuestra costa.

Con respecto a esto, mi afirmación de que existen límites a lo que el cerebro humano puede entender la rebatió David Deutsch, un físico que ha liderado conceptos clave de la «computación cuántica». En su excelente y provocador libro *The Beginning of Infinity*<sup>[68]</sup>, Deutsch indicaba que cualquier proceso es, en principio, computable. Sin embargo, poder computar algo no es lo mismo que tener una comprensión esclarecedora de ello. Considérese un ejemplo de la geometría, en el que puntos en el plano se designan mediante dos números, la distancia a lo largo del eje de las  $x$  y a lo largo del eje de las  $y$ . Quien haya estudiado geometría en la escuela reconocerá que la ecuación  $x^2 + y^2 = 1$  describe un círculo. El famoso conjunto de Mandelbrot es

descrito por un algoritmo que puede escribirse en pocas líneas. Y su forma puede dibujarla incluso un ordenador de potencia modesta: su «complejidad de Kolmogórov» no es elevada. Pero ningún humano al que se le proporcione solo el algoritmo puede entender y visualizar este patrón «fractal» inmensamente complicado de la misma manera en que puede visualizar un círculo.

Podemos esperar otros avances espectaculares en las ciencias durante este siglo. Se dará respuesta a muchas preguntas que ahora nos dejan perplejos, y se plantearán nuevas preguntas que en la actualidad ni siquiera podemos concebir. No obstante, hemos de tener la mente abierta acerca de la posibilidad de que, a pesar de todos nuestros esfuerzos, algunas verdades fundamentales acerca de la naturaleza puedan ser demasiado complejas para que el cerebro humano, sin ayuda, las pueda entender completamente. De hecho, quizá nunca comprenderemos el misterio de este mismo cerebro: cómo los átomos pueden ensamblarse en «materia gris» que puede hacerse consciente de sí misma y meditar sobre sus orígenes. O quizá cualquier universo lo bastante complicado para haber permitido nuestra aparición es precisamente por esta razón demasiado complicado para que nuestra mente lo comprenda.

Si el futuro a largo plazo recaerá en poshumanos orgánicos o en máquinas inteligentes, es una cuestión abierta al debate. Pero seríamos demasiado antropocéntricos si creyéramos que la comprensión completa de la realidad física está al alcance de la humanidad, y que no quedarán enigmas para poner a prueba a nuestros descendientes poshumanos.

## **¿Y QUÉ HAY DE DIOS?**

Si la pregunta número uno que se hace a los astrónomos es: ¿estamos solos?, la pregunta número dos es, seguro: ¿cree usted en Dios? Mi respuesta conciliadora es que yo no creo, pero que comparto una sensación de maravilla y misterio con muchos que sí creen.

La interrelación entre la ciencia y la religión todavía engendra controversia, aunque no ha habido ningún cambio esencial desde el siglo XVII. Los descubrimientos de Newton desencadenaron toda una gama de respuestas religiosas (y antirreligiosas). Lo mismo, incluso más, ocurrió con Darwin en el siglo XIX. Los científicos de hoy en día demuestran una variedad de actitudes religiosas; entre ellos hay creyentes tradicionales así como ateos de



línea dura. Mi versión personal, aburrida para los que desean promover un diálogo constructivo (o incluso solo un debate no constructivo) entre la ciencia y la religión, es que, si algo hemos aprendido de la actividad de la ciencia es que incluso algo tan básico como un átomo es muy difícil de entender. Esto debería introducir una dosis de escepticismo en relación con cualquier dogma, o con cualquier afirmación de haber conseguido más que una intuición muy incompleta y metafórica en cualquier aspecto profundo de la existencia. Tal como Darwin le dijo en una carta al biólogo americano Asa Gray:

Siento en lo más hondo que todo el tema es demasiado profundo para el intelecto humano. Es como si un perro pudiera especular acerca de la mente de Newton. Que cada hombre espere y crea como pueda<sup>[69]</sup>.

Los creacionistas creen que Dios creó la Tierra más o menos como es, sin dejar margen para la aparición de nuevas especies o para aumentar la complejidad, y prestando poca atención al cosmos más amplio. Es imposible refutar, por pura lógica, incluso a alguien que afirme que el universo se creó hace una hora, junto con todos los recuerdos y todos los vestigios de la historia anterior. Algunos conceptos «creacionistas» son dominantes todavía entre muchos evangélicos de los Estados Unidos y en partes del mundo musulmán. En Kentucky existe un «museo de la creación», con lo que sus promotores describen como un Arca de Noé de «tamaño real», de 153 metros de largo, que se construyó con un coste de 150 millones de dólares.

Ahora está de moda una variante más sofisticada: el «diseño inteligente». Este concepto acepta la evolución pero niega que la selección natural aleatoria pueda explicar la cadena de acontecimientos inmensamente larga que condujo a nuestra aparición. Se aprovechan en gran manera aquellas fases en las que un componente clave de los seres vivos parece haber requerido una serie de pasos evolutivos en lugar de un único salto, pero en las que los pasos intermedios no habrían conferido por sí mismos una ventaja de supervivencia. Pero este estilo de argumentación es equivalente al creacionismo tradicional. El «creyente» se centra en algunos detalles (y hay muchos) que todavía no se comprenden y aduce que el misterio aparente constituye un fallo fundamental de la teoría. Todo puede «explicarse» invocando la intervención sobrenatural. Así, si el éxito se mide por tener una explicación, por traída por los pelos que sea, entonces los «diseñadores inteligentes» siempre ganarán.

Pero una explicación solo tiene valor en la medida en que integre fenómenos dispares y los relacione con un único principio subyacente o una idea unificada. Un principio como ese es la selección natural darwiniana tal como se explica en *El origen de las especies*, un libro que el propio Darwin describió como «un largo debate». En realidad, la primera gran idea unificadora fue la ley de la gravitación de Newton, que identificaba la atracción gravitatoria familiar que nos mantiene sobre el suelo y hace que una manzana caiga con la fuerza que mantiene la Luna y los planetas en sus órbitas. Debido a Newton, no es necesario que registremos la caída de cada manzana.

El diseño inteligente se remonta a los argumentos clásicos: un diseño necesita un diseñador. Hace dos siglos, el teólogo William Paley introdujo la metáfora, ahora bien conocida, del reloj y el relojero, y adujo que el ojo, el pulgar oponible, etc., son prueba de un Creador benévolo<sup>[70]</sup>. Ahora consideramos que cada invento biológico es el resultado de una selección evolutiva prolongada y de simbiosis con su entorno. Los argumentos de Paley han dejado de tener credibilidad incluso entre los teólogos<sup>[71]</sup>.

La visión que Paley tenía de la astronomía era que no era la ciencia más idónea para producir pruebas de diseño, pero que, «habiendo demostrado esto, muestra, por encima de todas las demás, la escala de las operaciones [del Creador]». Paley podría haber reaccionado de forma diferente si hubiera conocido la física, en apariencia providencial, que condujo a las galaxias, las estrellas, los planetas y los elementos distintivos de la tabla periódica. El universo evolucionó a partir de un inicio simple (un «Big Bang»), especificado por una receta muy corta. Pero las leyes físicas vienen «dadas» en lugar de haber evolucionado. Las afirmaciones de que esta receta parece bastante especial no pueden descartarse tan fácilmente como las pruebas biológicas de Paley (y una explicación posible en términos de un multiverso se menciona en el tercer apartado del capítulo 4).

Un homólogo moderno de Paley, el físico y exmatemático John Polkinghorne, interpreta nuestro hábitat ajustado como «la creación de un Creador que quiere que ello sea así»<sup>[72]</sup>. He tenido debates públicos geniales con Polkinghorne; me enseñó física cuando yo era estudiante en Cambridge. El guion que sigo es que su teología es demasiado antropocéntrica y restringida para ser creíble. Polkinghorne no defiende el «diseño inteligente», pero cree que Dios puede influir en el mundo dando un golpecito o un pellizco en lugares y momentos en los que el resultado es especialmente

sensible a pequeños cambios: el máximo impacto con un esfuerzo mínimo y ocultado de inmediato.

Cuando me reúno con sacerdotes cristianos (o con sus equivalentes en otros credos), intento indagar qué es lo que consideran la «base», el «mínimo teórico» que sus adeptos han de aceptar. Es evidente que muchos cristianos consideran que la resurrección es un acontecimiento histórico y físico. Polkinghorne así lo hace, ciertamente; lo adorna como física, diciendo que Cristo efectuó la transición a un estado material exótico que nos acaecerá a todos nosotros cuando llegue el apocalipsis. Y en su mensaje de Pascua de 2018, el arzobispo de Canterbury, Justin Welby, dijo que si la resurrección es «solo un cuento o una metáfora, francamente, yo debiera renunciar a mi trabajo». Pero ¿cuántos católicos creen realmente en los dos milagros (la parte «práctica» del examen) que un candidato potencial ha de lograr con el fin de cumplir los requisitos para que se le considere un santo? Me siento genuinamente perplejo de que haya tantos que tengan una fe con este contenido tan literal.

Yo me describiría como cristiano practicante pero no creyente. El concepto paralelo es familiar entre los judíos: son muchos los que siguen las observancias tradicionales (encender cirios la noche de los viernes, etc.). Pero esto no significa necesariamente que concedan a su religión ninguna prioridad, y todavía menos que afirmen que posea ninguna verdad única. Incluso pueden describirse como ateos. Asimismo, en tanto que «cristiano cultural», me siento satisfecho de participar (aunque de forma irregular) en los rituales de la Iglesia anglicana con los que estoy familiarizado desde la primera infancia.

Sin embargo, los ateos de posición firme se centran demasiado en el dogma religioso y en lo que se denomina «teología natural»: buscar evidencia de lo sobrenatural en el mundo físico. Han de ser conscientes de que hay personas «religiosas» que manifiestamente no son bobos ni ingenuos. Al atacar a la religión común, en lugar de esforzarse para coexistir pacíficamente con ella, debilitan la alianza contra el fundamentalismo y el fanatismo. También debilitan la ciencia. Si a un joven musulmán o cristiano evangélico se le dice que no pueden tener a su Dios y aceptar la evolución, optarán por su Dios y se perderán para la ciencia. Los partidarios de la mayoría de las religiones conceden gran importancia a los aspectos comunitarios y rituales de su credo; de hecho, muchos de ellos podrían preferir el ritual a la creencia. Cuando hay tanto que nos divide, y el cambio es perturbadoramente rápido, estos rituales compartidos ofrecen vínculos afectivos con una comunidad. Y

las tradiciones religiosas, que conectan a los seguidores con las generaciones pretéritas, deben reforzar nuestra preocupación de que no hemos de dejar un mundo degradado a las generaciones venideras.

Esta línea de pensamiento fluye tranquilamente hacia mi tema final: ¿cómo hemos de responder a los retos del siglo XXI y reducir la brecha entre el mundo tal como es y el mundo en el que nos gustaría vivir y compartir con el resto de la «creación»?

# 5

## CONCLUSIONES

### HACIENDO CIENCIA

El capítulo 1 de este libro destacaba las transformaciones que tienen lugar en este siglo: sin precedentes por su velocidad y por el estrés que ejercen sobre el ambiente global. El capítulo 2 se centraba en los avances científicos que podemos esperar en las décadas que se avecinan, y se destacaban los beneficios, pero asimismo los dilemas éticos y el riesgo de disrupción o incluso de catástrofe. El capítulo 3 exploraba horizontes más amplios tanto en el espacio como en el tiempo, y especulaba sobre ámbitos situados mucho más allá de nuestro planeta y sobre las perspectivas de un futuro «poshumano». El capítulo 4 valoraba las posibilidades de comprendernos, a nosotros y al mundo, más profundamente: qué podemos aprender y qué puede que esté para siempre más allá de nuestro alcance. En las últimas páginas me centro más específicamente en el aquí y el ahora, para explorar, frente a este telón de fondo, el papel de los científicos. Distingo sus obligaciones especiales de las que nos corresponden a todos, como humanos y como ciudadanos preocupados por el mundo que heredarán las generaciones futuras.

Pero, primero, una aclaración importante: empleo «ciencia» en todo el texto como un resumen que incluye también tecnología e ingeniería. Aprovechar y poner en marcha un concepto científico para fines prácticos puede ser un reto mayor que el descubrimiento inicial. Un chiste favorito de mis amigos ingenieros muestra a dos castores que contemplan una gran presa hidroeléctrica. Un castor le dice al otro: «No la construí realmente yo, pero se basa en mi idea». Y me gusta recordarles a mis colegas que el ingeniero sueco Gideon Sundback, que inventó la cremallera, realizó un salto intelectual mayor que el que la mayoría de nosotros haremos nunca.

Se cree en general que los científicos siguen un procedimiento distintivo que se describe como el método científico. Debería ponerse fin a esta creencia. Sería más cierto decir que los científicos siguen el mismo estilo de razonamiento racional que los abogados o los detectives a la hora de

categorizar fenómenos y evaluar la evidencia. Una percepción errónea relacionada (y, de hecho, dañina) es la presunción extendida de que hay algo especialmente elitista en la calidad de su pensamiento. La capacidad académica es una faceta del concepto muchísimo más amplio de capacidad intelectual (y que poseen en igual medida periodistas, abogados, ingenieros y políticos). E. O. Wilson (el ecólogo al que se citaba en el cuarto apartado del capítulo 1) asevera que para ser efectivo en algunos campos científicos es realmente mejor no ser demasiado brillante<sup>[73]</sup>. Wilson no menosprecia las intuiciones y los momentos ¡eureka! que interrumpen (aunque sea raramente) la vida activa de los científicos. Pero, en tanto que experto mundial en decenas de miles de especies de hormigas, la investigación de Wilson ha supuesto décadas de trabajo duro: la teorización de salón no es suficiente. Así, existe el riesgo de aburrimiento. Y Wilson tiene efectivamente razón al decir que los que tienen períodos de atención cortos (con «mentes de cigarra») pueden encontrar puestos de trabajo más felices (aunque no valgan tanto la pena) como «agentes de milisegundos» en Wall Street, o cosas parecidas.

Por lo general los científicos prestan demasiado poca atención a la filosofía, pero algunos filósofos influyen en ellos. Karl Popper, en particular, captó la imaginación de los científicos en la segunda mitad del siglo xx<sup>[74]</sup>. Estaba en lo cierto al decir que una teoría científica tenía que ser en principio refutable. Si una teoría es tan flexible (o sus defensores tan aparentemente volubles) que puede ajustarse para que encaje en cualquier eventualidad, entonces no es ciencia genuina. La reencarnación es un ejemplo. En un libro bien conocido, el biólogo Peter Medawar<sup>[75]</sup>, de manera algo más polémica, atacó el psicoanálisis freudiano sobre esta base, clavando con fuerza el cuchillo al final:

Considerado en su totalidad, el psicoanálisis no funciona. Además, es un producto final, como un dinosaurio o un zepelín, no se podrá erigir nunca una teoría mejor sobre sus ruinas, que seguirán siendo siempre uno de los hitos más tristes y extraños de todos los que hay en la historia del pensamiento del siglo xx.

Pero, no obstante, la doctrina Popper tiene dos puntos débiles. En primer lugar, la interpretación depende del contexto. Considérese, por ejemplo, el experimento de Michelson-Morley, que demostró a finales del siglo xix que la velocidad de la luz (medida mediante un reloj en el laboratorio) era la misma con independencia de lo rápido que el laboratorio se moviera, y la

misma en todas las épocas del año, a pesar del movimiento de la Tierra. Después se comprendió que esto era una consecuencia natural de la teoría de Einstein. Pero si el mismo experimento se hubiera realizado en el siglo XVII, se habría aducido como prueba de que la Tierra no se mueve, y se habría reivindicado como una refutación de Copérnico. En segundo lugar, se necesita juicio a la hora de decidir cuán convincente ha de ser la evidencia contraria antes de abandonar una teoría bien fundamentada. Tal como supuestamente dijo Francis Crick, codescubridor de la estructura del ADN, si una teoría concuerda con todos los hechos, esto es una mala noticia, porque es probable que algunos «hechos» sean falsos.

El filósofo norteamericano Thomas Kuhn, segundo en importancia después de Popper, ha ganado terreno con su concepto de que la «ciencia normal» está interrumpida por «cambios de paradigma»<sup>[76]</sup>. La revolución copernicana, que derrocó el concepto de un cosmos centrado en la Tierra, cumple los requisitos de un cambio de paradigma. También los cumple el habernos dado cuenta de que los átomos se rigen por efectos cuánticos, absolutamente contrarios a la lógica y todavía misteriosos. Pero muchos de los discípulos de Kuhn (aunque quizá no el propio Kuhn) usaron la frase con excesiva libertad. Por ejemplo, se dice de forma rutinaria que Einstein destronó a Newton. Pero es más justo decir que trascendió a Newton. La teoría de Einstein se aplicó más ampliamente (a contextos en los que las fuerzas son muy intensas o las velocidades muy elevadas) y proporcionó una comprensión mucho más profunda de la gravedad, el espacio y el tiempo. La modificación gradual de teorías, y su absorción en otras nuevas de mayor generalidad, ha sido la pauta en la mayoría de las ciencias<sup>[77]</sup>.

Las ciencias exigen una gama de diferentes tipos de pericia y diferentes estilos; las pueden llevar a cabo teóricos especulativos, experimentadores solitarios, ecólogos que obtienen datos en el campo y equipos cuasindustriales que trabajan en gigantescos aceleradores de partículas o en grandes proyectos espaciales. De manera más común, el trabajo científico implica colaboración y debate en un pequeño grupo de investigación. Algunas personas aspiran a escribir un artículo pionero que inaugure un tema; otras obtienen más satisfacción al escribir una monografía definitiva que ordene y codifique un tema después de que este se ha entendido bien.

De hecho, las ciencias son tan diversas como los deportes. Es difícil escribir de manera genérica sobre deportes e ir más allá de generalidades huecas: elogiar la vena competitiva de la humanidad, etc. Es más interesante escribir acerca de las características distintivas de un deporte concreto; más

emocionante todavía son las particularidades de juegos especialmente excitantes y las personalidades de jugadores clave. Lo mismo ocurre con las ciencias. Cada ciencia concreta tiene sus métodos y convenciones. Y lo que más despierta nuestro interés es la fascinación del descubrimiento o intuición individuales.

El avance acumulativo de la ciencia requiere nueva tecnología y nuevos instrumentos; en simbiosis, desde luego, con la teoría y la intuición. Por su escala, algunos instrumentos son «de sobremesa». En el otro extremo, el Gran Colisionador de Hadrones del CERN, en Ginebra, de 9 kilómetros de diámetro, es en la actualidad el instrumento científico más complejo del mundo. Su finalización en 2009 generó un alboroto entusiasta y un amplio interés público, pero al mismo tiempo, y de forma comprensible, se plantearon preguntas acerca de por qué una inversión tan grande se hacía en la ciencia aparentemente recóndita de la física subnuclear. Pero lo que es especial de esta rama de la ciencia es que sus practicantes en muchos países diferentes han elegido dedicar la mayoría de sus recursos a lo largo de un período temporal de casi veinte años a construir y operar un único instrumento enorme en una colaboración dirigida por Europa. La contribución anual que hacen las naciones participantes (como el Reino Unido) supone solo alrededor del 2 % de su presupuesto total para la ciencia académica, lo que no parece una asignación desproporcionada a un campo tan exigente y fundamental. Esta colaboración global en un proyecto único para indagar algunos de los misterios más fundamentales de la naturaleza (y empujar la tecnología hasta sus límites) es seguramente algo por lo que nuestra civilización puede sentirse orgullosa. Asimismo, los instrumentos astronómicos los hacen funcionar consorcios multinacionales, y algunos son proyectos verdaderamente mundiales: por ejemplo, en el radiotelescopio ALMA en Chile (Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array)<sup>[78]</sup> participan Europa, los Estados Unidos y Japón.

Los que emprenden una investigación deben elegir un tema que se adapte a su personalidad, y también a sus habilidades y gustos (¿Para el trabajo de campo? ¿Para la modelización mediante ordenador? ¿Para experimentos de alta precisión? ¿Para manejar enormes conjuntos de datos? Y así sucesivamente). Además, los investigadores jóvenes pueden esperar que les resulte especialmente gratificante entrar en un campo en el que las cosas avanzan rápidamente (en el que se tiene acceso a técnicas nuevas, a ordenadores más potentes o a mayores conjuntos de datos), de modo que la experiencia de la generación de mayor edad tiene poco valor. Y otra cosa: es



imprudente atacar de frente el problema más importante o fundamental. Debemos multiplicar la importancia del problema por la probabilidad de que lo resolvamos, y maximizar dicho producto. Los científicos aspirantes no deben dedicarse todos, por ejemplo, a la unificación del cosmos y el cuanto, aunque esta es claramente una de las cimas intelectuales que aspiramos alcanzar, y deben darse cuenta de que los grandes desafíos en la investigación del cáncer y en la neurociencia han de abordarse poco a poco, y no frontalmente. (Tal como se mencionó en el quinto apartado del capítulo 3, la investigación del origen de la vida solía estar en esta categoría, pero ahora se considera que es oportuna y tratable de una manera que hasta fecha reciente no era posible).

¿Y qué hay de los que se pasan a un nuevo campo de la ciencia a media carrera? La capacidad de aportar nuevos enfoques y una nueva perspectiva es un beneficio adicional; de hecho, los campos más vibrantes suelen cortar a través de los límites tradicionales de las disciplinas. Por otra parte, es cosa sabida que los científicos no mejoran con la edad, que «se queman». El físico Wolfgang Pauli tenía una famosa frase despectiva para los científicos de más de treinta años: «Tan joven todavía, y ya tan desconocido». Pero espero que esto no sea solo el deseo por parte de un científico anciano de ser menos fatalista. Parece que hay tres destinos para nosotros. El primero, y más común, es centrarse cada vez menos en la investigación, lo que a veces se compensa mediante esfuerzos enérgicos en otras direcciones, a veces solo por una caída en el letargo. Una segunda ruta, que han seguido algunos de los grandes científicos, es una diversificación imprudente y excesivamente confiada hacia otros campos. Los que siguen esta ruta están todavía, según ellos mismos, «haciendo ciencia»: quieren comprender el mundo y el cosmos, pero ya no obtienen satisfacción de investigar de la manera tradicional, poco a poco: suelen abarcar demasiado, a veces ante el bochorno de sus admiradores. Este síndrome se ha agravado por la tendencia a proteger de las críticas a los eminentes y a los ancianos... aunque uno de los muchos beneficios de una sociedad menos jerárquica es que este aislamiento es ahora más raro, al menos en Occidente; además, la naturaleza cada vez más colaborativa de la ciencia hace que el aislamiento sea menos probable. Pero hay una tercera manera, la más admirable. Esta es continuar haciendo aquello en lo que uno es competente, aceptar que puede haber algunas nuevas técnicas que los jóvenes pueden asimilar más fácilmente que los viejos, y que probablemente uno puede, en el mejor de los casos, aspirar a estar en una meseta en lugar de escalar nuevas cumbres.

Hay algunas excepciones de «floración tardía». Pero mientras que hay muchos compositores cuyas últimas obras son las mejores, existen pocos científicos a los que les haya pasado lo mismo. La razón, según creo, es que los compositores, aunque influidos en su juventud (como los científicos) por la cultura y el estilo que entonces dominaban, pueden acto seguido mejorar y profundizar únicamente mediante «desarrollo interno». Los científicos, en cambio, necesitan absorber continuamente nuevos conceptos y nuevas técnicas si es que quieren mantenerse en la frontera... y esto es lo que resulta más difícil cuando nos hacemos mayores.

Muchas ciencias (la astronomía y la cosmología entre ellas) avanzan de década en década de manera que los que las practican pueden observar un «arco de progreso» durante su carrera. Paul Dirac, un líder de la extraordinaria revolución de la década de 1920 que codificó la teoría cuántica, dijo que se trataba de una era en la que las personas de segunda categoría hicieron trabajo de «primera categoría». Afortunadamente para mi generación de astrónomos, esto ha sido cierto en nuestro campo en las últimas décadas.

Los mejores laboratorios, al igual que las mejores empresas emergentes, deben ser incubadores óptimos de ideas originales y de talento joven. Pero existe una tendencia demográfica insidiosa que milita contra esto en las universidades e institutos tradicionales. Hace cincuenta años, la ciencia como profesión estaba creciendo todavía exponencialmente, basada en la expansión de la educación superior, y los jóvenes eran más numerosos que los viejos; además, era normal (y en general obligatorio) que uno se retirara a partir de los sesenta años. En la actualidad, la comunidad académica, al menos en Occidente, no se expande demasiado (y en muchas áreas ha llegado al nivel de saturación), y no existe una edad de jubilación obligatoria. En décadas anteriores, era razonable aspirar a dirigir un grupo cuando uno se hallaba en los primeros años de la treintena; pero en la comunidad biomédica de los Estados Unidos ahora es insólito obtener la primera subvención de investigación antes de los cuarenta años de edad. Este es un augurio malísimo. La ciencia siempre atraerá a «empollones» que no pueden considerar ninguna otra carrera. Y los laboratorios pueden estar repletos de los que se contentan con escribir proyectos de investigación, que por lo general no consiguen financiación. Pero la profesión necesita atraer a una parte de los que tienen talento flexible y la ambición de lograr algo antes de los treinta años. Si esta perspectiva percibida se evapora, esta gente dejará de lado el ámbito académico y quizá intente crear una empresa emergente. Este camino proporciona una gran satisfacción y beneficio social (muchos

deberían emprenderlo), pero a la larga es importante que algunas de estas personas se dediquen a las fronteras fundamentales. Se puede encontrar el origen de los progresos en TI e informática en la investigación básica que se ha hecho en universidades punteras, en algunos casos hace cerca de un siglo. Y los escollos con los que se encuentra la investigación médica proceden de conocimientos inciertos de aspectos fundamentales. Por ejemplo, la incapacidad de los medicamentos antialzhéimer para superar las pruebas clínicas, que ha causado que Pfizer abandone su programa para desarrollar medicamentos neurológicos, puede indicar que no se sabe lo suficiente acerca de cómo funciona el cerebro y que el esfuerzo debería centrarse de nuevo en la ciencia básica.

La expansión de la riqueza y del ocio, junto con la conectividad que permiten las TI, ofrecerán a millones de aficionados cultos y a «científicos ciudadanos» de todo el mundo una oportunidad mayor que nunca para desarrollar sus intereses. Además, estas tendencias permitirán que los investigadores principales hagan un trabajo pionero fuera de la academia tradicional o del laboratorio gubernamental. Si hay suficientes personas que eligen este camino, esto erosionaría la primacía de las universidades de investigación y fomentaría la importancia de los «científicos independientes» hasta el nivel que era común antes del siglo XX... y quizá mejoraría el florecimiento de ideas genuinamente originales.

## **LA CIENCIA EN SOCIEDAD**

Un tema principal de este libro es que nuestro futuro depende de hacer elecciones sensatas acerca de retos sociales clave: energía, salud, alimentación, robótica, medio ambiente, espacio, etc. Estas elecciones implican ciencia. Pero las decisiones clave no las deben tomar solo los científicos; son importantes para nosotros y han de ser el resultado de un amplio debate público. Para que esto ocurra, todos necesitamos tener la suficiente «percepción» para las ideas clave de la ciencia, y entender de manera suficiente los números para evaluar peligros, probabilidades y riesgos, para que los expertos no nos desorienten y para no ser crédulos frente a las consignas populistas.

Aquellos que aspiran a una democracia más comprometida se lamentan de forma rutinaria de lo poco que el votante típico sabe de las cuestiones relevantes. Pero la ignorancia no es privativa de la ciencia. Es igualmente

triste que los ciudadanos no conozcan la historia de su nación, no puedan hablar una segunda lengua y no puedan encontrar Corea del Norte o Siria en un mapa... y son muchos los que no pueden hacerlo. (En una encuesta, ¡solo un tercio de los estadounidenses pudieron encontrar Gran Bretaña en un mapa!). Esta es una crítica de nuestro sistema educativo y de la cultura en general; no creo que los científicos tengan un motivo especial para quejarse. De hecho, me satisface y me sorprende que tantas personas se interesen por los dinosaurios, las lunas de Saturno y el bosón de Higgs (todos ellos temas absolutamente irrelevantes para nuestra vida cotidiana) y que estas cuestiones aparezcan con tanta frecuencia en los medios de comunicación populares.

Además, y dejando aparte su uso práctico, estas ideas deben formar parte de nuestra cultura común. Más que eso: la ciencia es la única cultura que es verdaderamente mundial: protones, proteínas y Pitágoras son los mismos desde la China hasta el Perú. La ciencia debería trascender todas las barreras de nacionalidad. Y también tendría que extenderse por todos los credos religiosos. Es una carencia intelectual no comprender nuestro ambiente natural y los principios que rigen la biosfera y el clima. Y ser ciego ante la maravillosa visión que ofrecen el darwinismo y la cosmología moderna: la cadena de complejidad emergente que conduce desde una «gran explosión» a las estrellas, los planetas, las biosferas y el cerebro humano, que hace que el cosmos sea consciente de sí mismo. Estas «leyes» o pautas son los grandes triunfos de la ciencia. Descubrir las requirió talento entregado, incluso genio. Y las grandes invenciones requieren un talento equivalente. Pero entender las ideas clave no es tan difícil. La mayoría de nosotros apreciamos la música aunque no podamos componerla, o ni siquiera ejecutarla. Asimismo, casi todo el mundo puede acceder a las ideas clave de la ciencia, y disfrutarlas, si se transmiten utilizando términos no técnicos e imágenes simples. Los tecnicismos pueden ser abrumadores, pero pueden dejarse para los especialistas.

Los avances en la tecnología han llevado a un mundo en el que la mayoría de la gente goza de una vida más segura, más larga y más satisfactoria que las generaciones anteriores, y estas tendencias positivas pueden continuar. Por otra parte, la degradación medioambiental, el cambio climático desenfrenado y los aspectos negativos de la tecnología avanzada son resultados colaterales de estos avances. Un mundo con una mayor población más exigente de energía y recursos, y más empoderada por la tecnología, podría desencadenar contratiempos graves, incluso catastróficos, para nuestra sociedad.

La sociedad se niega todavía a aceptar dos tipos de amenazas: el daño que estamos causando colectivamente a la biosfera y las amenazas que proceden de la mayor vulnerabilidad de nuestro mundo interconectado ante el error o el terror inducido por individuos o grupos reducidos. Además, lo que es nuevo en este siglo es que una catástrofe tendrá repercusiones planetarias. En su libro *Collapse*<sup>[79]</sup>, Jared Diamond describe cómo y por qué cinco sociedades diferentes entraron en decadencia o padecieron catástrofes, y ofrece pronósticos contrastados para algunas sociedades modernas. Pero estos acontecimientos no fueron globales; por ejemplo, la peste negra no llegó a Australia. Pero en nuestro mundo conectado en red, no habría ningún lugar en el que esconderse de las consecuencias del colapso económico, una pandemia o una gran reducción de los recursos alimentarios mundiales. Y existen otras amenazas mundiales; por ejemplo, los incendios intensos posteriores a un intercambio nuclear podrían crear un «invierno nuclear» persistente, que impediría, en las peores situaciones hipotéticas, el crecimiento de los cultivos convencionales durante varios años (como podría ocurrir después del impacto de un asteroide o de la erupción de un supervolcán).

Ante tal aprieto, la inteligencia colectiva sería crucial. Ninguna persona concreta comprende totalmente el teléfono inteligente, una síntesis de varias tecnologías. De hecho, si nos encontráramos abandonados y solos después de un «apocalipsis», como en las películas de supervivencia extrema, incluso las tecnologías básicas de la Edad de Hierro y la agricultura se hallarían fuera de la capacidad de casi todos nosotros. A propósito de esto, esta es la razón por la que James Lovelock, el erudito que introdujo la hipótesis de Gaia (la ecología planetaria que se autorregula), ha animado a que se preparen «manuales de supervivencia» que codifiquen la tecnología básica, y que se distribuyan ampliamente y se almacenen con seguridad. Este reto lo ha aceptado, por ejemplo, el astrónomo británico Lewis Dartnell en su excelente libro *The Knowledge: How to Rebuild Our World from Scratch*<sup>[80]</sup>.

Deberían hacerse más cosas para evaluar, y después minimizar, la probabilidad de amenazas globales. Vivimos a su sombra, y aumentan los riesgos para la humanidad. La amenaza emergente de disidentes empoderados técnicamente está aumentando. Los problemas nos impelen a planificar a escala internacional (por ejemplo, el que una pandemia alcance o no un ámbito mundial puede depender de lo rápido que un avicultor vietnamita pueda informar de una enfermedad rara). Y muchos de los retos (por ejemplo, planificar cómo enfrentarse a las necesidades energéticas mundiales al tiempo que se evita el peligroso cambio climático, y garantizar la seguridad

alimentaria para nueve mil millones de personas sin poner en peligro un medio ambiente sostenible) implican escalas temporales de muchas décadas, las cuales es evidente que quedan muy lejos de la «zona de confort» de la mayoría de los políticos. La planificación a largo plazo y la planificación global son un fracaso institucional.

No puede negarse que las tecnologías futuristas, si se aplican mal, pueden conducir a peligros, incluso a catástrofes. Es importante sacar partido de la mejor experiencia para evaluar qué riesgos son creíbles, y cuáles pueden descartarse como ciencia ficción, y centrar las medidas precautorias en los primeros. ¿Cómo puede hacerse esto? No es factible controlar el ritmo de avance, menos todavía dejar totalmente de lado actividades potencialmente peligrosas, a menos que una única organización administre el dinero, y esto es por completo poco realista en un mundo globalizado con una mezcla de financiación comercial, filantrópica y gubernamental. Pero aunque las normativas no pueden ser ni mucho menos efectivas en un 100 % (y pueden proporcionar poco más que un «empujoncito»), es importante que la comunidad científica haga todo lo que pueda para promover la «innovación responsable». En particular, puede ser crucial influir en el orden en que diversas innovaciones dan resultados. Por ejemplo, si una IA superpotente se volviera malvada, entonces sería demasiado tarde para controlar otras situaciones; en cambio, una IA firmemente bajo control humano pero muy dotada podría ayudar a reducir el riesgo procedente de la biotecnología o la nanotecnología.

Puede ser necesario que las naciones cedan más soberanía a nuevas organizaciones mundiales, según lo que se ha hecho con la Agencia Internacional de Energía Atómica, la Organización Mundial de la Salud, etc. Ya existen entidades internacionales que regulan los viajes en avión, la adjudicación de frecuencias de radio, etc. Y existen protocolos como el acuerdo posterior a la Conferencia de París sobre Cambio Climático. Pueden necesitarse más de este tipo de organizaciones para planificar la generación de energía, para asegurar el reparto de los recursos hídricos y para la explotación responsable de la IA y de la tecnología espacial. Hoy en día se están erosionando las fronteras nacionales, y no en menor medida por los cuasimonopolios como Google y Facebook. Las nuevas organizaciones han de conservar la rendición de cuentas a los gobiernos, pero necesitarán usar las redes sociales (tal como lo hacen ahora y lo harán en las décadas futuras) e implicar al público. Las redes sociales involucran a un enorme número de personas en las campañas, pero la barrera para su implicación es tan baja que

la mayoría carece del compromiso de los participantes en los movimientos de masas del pasado. Además, los medios de comunicación facilitan organizar una protesta, así como amplificar a todas las minorías disidentes, lo que se suma al reto de la gobernanza.

Pero ¿podrán las naciones-estado gobernar el mundo? Dos tendencias reducen la confianza interpersonal: en primer lugar, la lejanía y la globalización de aquellos con los que hemos de tratar de forma rutinaria; y en segundo lugar, la creciente vulnerabilidad de la vida moderna a la perturbación: el darnos cuenta de que *hackers* o disidentes pueden desencadenar incidentes que se diseminan en cascada a nivel mundial. Tales tendencias necesitan medidas de seguridad crecientes. Estas ya son irritantes en nuestra vida cotidiana (guardias de seguridad, contraseñas complicadas, cacheos en los aeropuertos, etc.), pero es probable que se hagan todavía más fastidiosas. Las innovaciones como la cadena de bloques, el libro de cuentas distribuido públicamente que combina el acceso abierto con la seguridad, pueden ofrecer protocolos que hagan que todo internet sea más seguro. Pero sus aplicaciones actuales (que permiten una economía basada en criptomonedas para funcionar de manera independiente de las instituciones financieras tradicionales) parecen lesivas en lugar de ser benignas. Es a la vez salutífero y deprimente darse cuenta de qué gran parte de la economía se dedica a actividades y productos que serían superfluos si consideráramos que podemos confiar unos en otros.

Las brechas en los niveles de salud y bienestar entre países muestran pocas señales de reducirse. Pero si persisten, el riesgo de trastornos permanentes aumentará. Ello es debido a que los necesitados son conscientes de la injusticia de su situación apurada; los viajes son más fáciles, y por lo tanto se necesitarán medidas más agresivas con el fin de controlar las presiones migratorias si estas aumentan. Pero aparte de las transferencias directas de fondos de la manera tradicional, internet y sus sucesores habrán de hacer más fácil que se proporcionen servicios en cualquier rincón del mundo, y que se difundan más ampliamente los beneficios educativos y sanitarios. Está en el interés del mundo rico invertir de forma masiva en mejorar la calidad de la vida y las oportunidades laborales en los países más pobres: minimizar las injusticias y «subir el nivel» del mundo.

## **ESPERANZAS Y TEMORES COMPARTIDOS**

Todos los científicos tienen obligaciones especiales además de su responsabilidad como ciudadanos. Existen obligaciones éticas que corresponden a la propia investigación científica: evitar experimentos que tengan siquiera el mínimo riesgo de conducir a una catástrofe, y respetar un código ético cuando la investigación implica animales o sujetos humanos. Pero surgen cuestiones menos manejables cuando la investigación tiene ramificaciones más allá del laboratorio y tiene un impacto potencial social, económico y ético que concierne a todos los ciudadanos; o cuando revela una amenaza grave pero todavía no apreciada. Seríamos malos padres si no nos preocupara lo que les ocurrirá a nuestros hijos cuando sean adultos, aunque podamos tener poco control sobre ellos. De la misma manera, los científicos no deberían sentirse indiferentes ante los frutos de sus ideas (sus creaciones). Han de intentar fomentar productos derivados, comerciales o de otro tipo. Deben resistirse, hasta donde puedan, a las aplicaciones dudosas o amenazadoras de su trabajo, y alertar a los políticos cuando sea apropiado. Si sus hallazgos provocan sensibilidades éticas (como ocurrirá con frecuencia y de forma importante) deben involucrarse con el público, al tiempo que han de ser conscientes de que no tienen unas credenciales claras fuera de su campo de especialidad.

Podemos señalar algunos magníficos paradigmas del pasado: por ejemplo, los científicos atómicos que desarrollaron las primeras armas nucleares durante la segunda guerra mundial. El destino les había asignado un papel central en la historia. Muchos de ellos (hombres como Joseph Rotblat, Hans Bethe, Rudolf Peierls y John Simpson, a todos los cuales tuve el privilegio de conocer en años posteriores) volvieron con alivio a sus ocupaciones académicas en tiempo de paz. Pero para ellos la torre de marfil no fue un santuario. Continuaron no solo como académicos, sino como ciudadanos comprometidos: promovieron intentos para controlar la energía que habían colaborado a desatar, a través de academias nacionales, del movimiento Pugwash y de otros foros públicos. Fueron los alquimistas de su época, poseedores de un conocimiento especializado y secreto.

Las tecnologías que he comentado en capítulos anteriores tienen implicaciones igual de trascendentales que las armas nucleares. Pero a diferencia de los «científicos atómicos», los que se dedican a los nuevos retos abarcan casi todas las ciencias, son ampliamente internacionales... y trabajan en el sector comercial así como en la academia y en el gobierno. Es necesario que sus hallazgos y preocupaciones conformen la planificación y la política. Así pues, ¿cuál es la mejor manera de hacerlo?



Los lazos directos establecidos con políticos y funcionarios de rango superior pueden ayudar, y los lazos con las ONG y el sector privado, también. Pero resulta frustrante que los expertos que han servido como asesores del gobierno hayan tenido, por regla general, muy poca influencia. Sin embargo, los políticos están influidos por sus bandejas de entrada, y por la prensa. A veces los científicos pueden conseguir más cosas como «externos» y activistas, transmitiendo su mensaje a través de libros muy leídos, de grupos que hacen campañas, escribiendo en un blog y ejerciendo de periodistas o, aunque a través de una variedad de perspectivas, mediante la actividad política. Si un público amplio transmite y amplifica su voz, y también lo hacen los medios de comunicación, las causas globales a largo plazo aparecerán y ganarán posiciones en la agenda política.

Rachel Carson y Carl Sagan, pongamos por caso, fueron preeminentes en su generación como ejemplos del científico preocupado, y tuvieron una influencia inmensa a través de sus escritos y sus conferencias. Y esto fue antes de la época de las redes sociales y de los tuits. Sagan, si estuviera vivo hoy, sería un líder de las «marchas por la ciencia»<sup>[81]</sup>, y emocionaría a las masas con su pasión y su elocuencia.

Una obligación especial corresponde a los que están en el mundo académico o a los emprendedores autónomos; tienen más libertad para implicarse en debates públicos que los que están empleados en el servicio al gobierno o en la industria. Los académicos, además, tienen la oportunidad especial de influir en los estudiantes. Las encuestas muestran, de forma nada sorprendente, que los jóvenes, que esperan sobrevivir durante la mayor parte del siglo, están más comprometidos y se muestran más inquietos acerca de las cuestiones a largo plazo y mundiales. La implicación estudiantil en campañas tales como, por ejemplo, el «altruismo efectivo», está aumentando. El libro *Doing Good Better*<sup>[82]</sup>, de William MacAskill, es un manifiesto convincente. Nos recuerda que pueden conseguirse mejoras urgentes y significativas en la vida de la gente si los recursos existentes se reutilizan y se dirigen adecuadamente hacia naciones en desarrollo y pobres. Las fundaciones adineradas tienen más capacidad (su arquetipo es la Fundación Bill y Melinda Gates, que ha tenido un impacto enorme, especialmente en la salud infantil), pero incluso ellas no pueden igualar el impacto que los gobiernos nacionales podrían tener si estuvieran presionados por los ciudadanos.

Ya he destacado el papel de las religiones del mundo, comunidades transnacionales que piensan a largo plazo y que se preocupan por la comunidad global, en especial por los pobres del mundo. Una iniciativa de

una organización laica, la Long Now Foundation, con sede en California, creará un símbolo que contrasta de manera espectacular con nuestro actual y generalizado cortoplacismo. En una caverna situada a gran profundidad en Nevada, se construirá un reloj enorme; está diseñado para funcionar (muy lentamente) durante diez mil años, programado para resonar con un repique diferente cada día a lo largo de este período de tiempo. Los que lo visitemos durante este siglo contemplaremos un monumento construido para durar más que las catedrales, y nos inspirará para esperar que dentro de cien siglos siga funcionando... y que algunos de nuestros descendientes lo visiten todavía.

Aunque vivimos bajo la sombra de peligros desconocidos y potencialmente catastróficos, no parece haber un impedimento *científico* para conseguir un mundo sostenible y seguro, en el que todos gocemos de un estilo de vida mejor que el que tenemos actualmente en «Occidente». Podemos ser unos optimistas tecnológicos, aunque el equilibrio del esfuerzo en tecnología necesite redirigirse. Los riesgos pueden reducirse gracias a una cultura de «innovación responsable», en especial en campos como la biotecnología, la IA avanzada y la geoingeniería, y dando prioridad, de nuevo, al impulso del esfuerzo tecnológico mundial. Hemos de seguir siendo optimistas acerca de la ciencia y la tecnología; no hemos de poner freno al progreso. La aplicación doctrinaria del «principio de precaución» tiene un lado negativo manifiesto. Superar las amenazas mundiales requiere más tecnología, pero guiada por la ciencia social y la ética.

La geopolítica y la sociología intratables (la brecha entre las potencialidades y lo que ocurre realmente) engendran pesimismo. Las situaciones hipotéticas que he descrito (degradación medioambiental, cambio climático desenfrenado y consecuencias involuntarias de la tecnología avanzada) podrían desencadenar contratiempos graves, incluso catastróficos, para la sociedad. Pero tienen que abordarse internacionalmente. Y la planificación a largo plazo y la planificación global son un fracaso institucional. Los políticos se fijan en sus votantes... y en las próximas elecciones. Los accionistas esperan un beneficio a corto plazo. Le quitamos importancia a lo que ocurre incluso ahora en países lejanos. Y subestimamos con demasiada facilidad los problemas que dejaremos a las nuevas generaciones. Sin una perspectiva más amplia, sin darnos cuenta de que estamos todos juntos en este mundo hacinado, los gobiernos no priorizarán proyectos que sean a largo plazo en una perspectiva política, incluso si son un mero instante en la historia del planeta.

La «Nave Espacial Tierra» se desplaza por el vacío a toda velocidad. Sus pasajeros están inquietos e irritables. Su sistema de soporte vital es vulnerable frente a las perturbaciones y las averías. Pero hay demasiada poca planificación, demasiado poco examen del horizonte, demasiada poca consciencia de los riesgos a largo plazo. Sería vergonzoso que legáramos a las generaciones futuras un mundo exhausto y peligroso.

Inicié este libro citando a H. G. Wells. Lo terminé recordando las palabras de un docto científico de la segunda mitad del siglo XX, Peter Medawar:

Las campanas que tañen por la humanidad son (la mayoría de ellas, por lo menos) como las campanas del ganado alpino; las llevamos fijadas a nuestro cuello, y será culpa nuestra si no emiten un sonido alegre y armonioso.

Ahora es el momento de una visión optimista del destino de la vida: en este mundo, y quizá más allá. Necesitamos pensar globalmente, necesitamos pensar racionalmente, necesitamos pensar a largo plazo... empoderados por la tecnología del siglo XXI, pero guiados por valores que solo la ciencia puede proporcionar.

# NOTAS

[1] Martin Rees, *From Here to Infinity: Scientific Horizons*, Profile Books, Londres, 2011; W. W. Norton, Nueva York, 2012. <<

[2] Conde de Birkenhead, *The World in 2030 AD*, Hodder and Stoughton, Londres, 1930. <<

[3] Martin Rees, *Our Final Century*, Random House, Londres, 2003. La edición en Estados Unidos (publicada por Basic Books) llevaba el título *Our Final Hour*. <<

[4] La conferencia de H. G. Wells, «El descubrimiento del futuro», se impartió en la Royal Institution, Londres, el 24 de enero de 1902, y posteriormente se publicó en un libro con este título. <<



[5] *We'll all go together when we go, / all suffused with an incandescent glow.*  
(N. del t.) <<

[6] «Resilient Military Systems and the Advanced Cyber Threat», Defense Science Board Report, enero de 2013. El general Petraeus y otras personalidades importantes de los Estados Unidos han reiterado unas preocupaciones similares. <<

[7] La revisión de 2017 de «World Population Prospects», de las Naciones Unidas, cita una estimación ajustada de 9700 millones para la población de 2050. Otra fuente autorizada es el Population Project del Instituto Internacional para el Análisis de Sistemas Aplicados (IIASA), que estima unas cifras algo menores. <<

[8] Hay traducción castellana: *La explosión demográfica*, Salvat, Barcelona, 1994.(N. del t.) <<

[9] Existen muchos informes sobre las existencias de alimentos y agua en el mundo, por ejemplo, el informe de 2013 «Modelling Earth's Future», preparado conjuntamente por la Royal Society y la National Academy of Sciences. <<

[10] «Our Common Future», Informe de la Comisión sobre Medio Ambiente y Desarrollo de las Naciones Unidas, 1987. <<

[11] La observación de Juncker se cita en *The Economist*, 15 de marzo de 2007. <<

[12] El concepto de «fronteras planetarias» aparece en un informe de 2009 del Stockholm Resilience Centre. <<



[13] Esta cita es del libro de E. O. Wilson *The Creation: An Appeal to Save Life on Earth*, W. W. Norton, Nueva York, 2006 (hay traducción castellana: *La creación. Salvemos la vida en la Tierra*, Katz, Buenos Aires, 2006). <<

[14] El congreso, celebrado del 2 al 6 de mayo de 2014, se titulaba «Sustainable Humanity, Sustainable Nature: Our Responsibility», y estuvo copatrocinado por la Academia Pontificia de las Ciencias y la Academia Pontificia de las Ciencias Sociales. <<

[15] Junto a Charles Darwin. (*N. del t.*) <<

[16] La cita es de Alfred Russel Wallace, *The Malay Archipelago*, Harper, Londres, 1869 (hay traducción castellana: *Viaje al archipiélago malayo*, Laertes, Barcelona, 1984). <<

[17] Entre los científicos implicados en este proyecto se cuentan C. Kennel, de la Universidad de California-San Diego, en La Jolla, y Emily Shuckburgh y Stephen Briggs, en el Reino Unido. <<

[18] *The Skeptical Environmentalist* fue publicado por Cambridge University Press en 2001 (hay traducción castellana: Bjørn Lomborg, *El ecologista escéptico*, Espasa Calpe, Pozuelo de Alarcón, 2003). El Consenso de Copenhague, fundado en 2002, se halla bajo los auspicios del Environmental Assessment Institute de Copenhague. <<

[19] *The Stern Review Report on the Economics of Climate Change*, HM Treasury, Londres, 2006. <<

[20] Gernot Wagner y Martin L. Weitzman, *Climate Shock: The Economic Consequences of a Hotter Planet*, Princeton University Press, Princeton (NJ), 2015. <<



[21] W. Mischel, Y. Shoda y M. L. Rodríguez, «Delay of Gratification in Children», *Science*, vol. 244, n.º 4907 (1989), pp. 933-938. <<

[22] Richard Stone, «Cuba's 100-Year Plan for Climate Change», *Science*, vol. 359, n.º 6372 (2018), pp. 144-145. <<

[23] En el Reino Unido, el tema de la economía circular ha despertado interés debido a la defensa que de ella ha hecho una persona muy admirada y conocida, Ellen MacArthur, la marina que ha dado la vuelta al mundo. <<

[24] Un informe excelente de la geoingeniería es el de Oliver Morton, *The Planet Remade: How Geoengineering Could Change the World*, Princeton University Press, Princeton (NJ), 2016. <<

[25] Es decir, «esclarecimiento, ilustración». (*N. del t.*) <<

[26] Los archivos de Robert Boyle, y este documento en concreto, los comenta Felicity Henderson en un informe de la Royal Society de 2010. <<

[27] Esta lista puede encontrarse en línea en: <<https://www.telegraph.co.uk/news/uknews/7798201/Robert-Boyles-Wish-list.html>> <<

[28] Dos libros muy accesibles sobre estas cuestiones son: Jennifer A. Doudna y Samuel S. Sternberg, *A Crack in Creation*, Houghton Mifflin Harcourt, Boston, 2017 (Jennifer Doudna es una de las inventoras del CRISPR/Cas9); Siddhartha Mukherjee, *The Gene: An Intimate History*, Scribner, Nueva York, 2016 (hay traducción castellana: *El gen. Una historia personal*, Debate, Barcelona, 2017). <<



[29] El artículo, de Ryan S. Noyce, Seth Lederman y David H. Evans, de la Universidad de Alberta, aparece en *PLOS One* y se comenta en *Science News* el 19 de enero de 2018. Ryan S. Noyce, Seth Lederman y David H. Evans, «Construction of an Infectious Horsepox Virus Vaccine from Chemically Synthesized DNA Fragments», *PLOS One* (19 de enero de 2018). Disponible en: <<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0188453>.> <<

[30] Chris D. Thomas, *Inheritors of the Earth*, Allen Lane, Londres, 2017. <<

[31] Steven Pinker, *The Better Angels of Our Nature: Why Violence Has Declined*, Penguin Books, Nueva York, 2011 (hay traducción castellana: *Los ángeles que llevamos dentro. El declive de la violencia y sus implicaciones*, Paidós, Barcelona, 2012). <<

[32] Freeman Dyson, *Dreams of Earth and Sky*, Penguin Random House, Nueva York, 2015. <<

[33] Un resumen de estos logros lo proporcionan Murray Shanahan, *The Technological Singularity*, MIT Press, Cambridge (MA), 2015, y Margaret Boden, *AI: Its Nature and Future*, Oxford University Press, Oxford, 2016. Una aproximación más especulativa la ofrece Max Tegmark, *Life 3.0: Being Human in the Age of Artificial Intelligence*, Penguin Random House, Nueva York, 2017. <<

[34] David Silver *et al.*, «Mastering the Game of Go without Human Knowledge», *Nature*, n.º 550 (2017), pp. 354-359. <<

[35] Es decir, sin conductor. (*N. del t.*) <<

[36] <[https://en.wikipedia.org/wiki/Reported\\_Road\\_Casualties\\_Great\\_Britain](https://en.wikipedia.org/wiki/Reported_Road_Casualties_Great_Britain)> <<



[37] Como la propuesta de Hyperloop, de Elon Musk. (*N. del t.*) <<

[38] Y la Universitat Oberta de Catalunya en España e Hispanoamérica.  
(*N. del t.*) <<

[39] La carta la organizó el Future of Life Institute, situado en el MIT. <<

[40] La cita de Stuart Russell es del *Financial Times*, 6 de enero de 2018. <<

[41] Véase Ray Kurzweil, *The Singularity Is Near: When Humans Transcend Biology*, Viking, Nueva York, 2005 (hay traducción castellana: *La singularidad está cerca: cuando los humanos transcendamos la biología*, Lola Books, Madrid, 2012. <<

[42] P. Hut y M. Rees, «How Stable Is Our Vacuum?», *Nature*, n.º302 (1983), pp. 508-509. <<

[43] Las argumentaciones de Derek Parfit se presentan en la parte 4 de sus *Reasons and Persons*, Oxford University Press, Nueva York, 1984 (hay traducción castellana: *Razones y personas*, Antonio Machado, Madrid, 2005).  
<<

[44] Unas buenas exposiciones de estos riesgos extremos se presentan en Nick Bostrom y Milan Ćirković, eds., *Global Catastrophic Risks*, Oxford University Press, Oxford, 2011, y en Phil Torres, *Morality, Foresight, and Human Flourishing: An Introduction to Existential Risks*, Durham, NC: Pitchstone, Durham (NC), 2017. <<



[45] Citado en Carl Sagan, *Pale Blue Dot: A Vision of a Human Future in Space*, Random House, Nueva York, 1994 (hay traducción castellana: *Un punto azul pálido. Una visión del futuro humano en el espacio*, Planeta, Barcelona 2003). <<

[46] Alfred Russel Wallace, *Man's Place in the Universe*, Chapman and Hall, Londres, 1902; este libro se puede descargar gratuitamente a través del proyecto Gutenberg. <<

[47] Michel Mayor y Didier Queloz, «A Jupiter-Mass Companion to a Solar-Type Star», *Nature*, n.º 378 (1995), pp. 355-359. <<

[48] La mejor información sobre los resultados de la nave espacial Kepler pueden encontrarse en la web de la NASA: <[https://www.nasa.gov/mission\\_pages/kepler/main/index.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/kepler/main/index.html)> <<

[49] Michaël Gillon *et al.*, «Seven Temperate Terrestrial Planets Around the Nearby Ultracool Dwarf Star TRAPPIST-1», *Nature*, n.º 542 (2017), pp. 456-460. <<

[50] El Gran Telescopio Canarias, en la isla de La Palma, es uno de los mayores telescopios ópticos del mundo, con un espejo de 10,4 metros. (N. del t.) <<

[51] Conjunto de un kilómetro cuadrado. (*N. del t.*) <<

[52] Telescopio Europeo Extremadamente Grande. (*N. del t.*) <<



[53] De hecho, China logró su propósito el 3 de enero de 2019, cuando la sonda Chang'e 4 se posó con éxito en la cara oculta de la Luna. (*N. del e.*) <<

[54] La aceleración láser la estudió el visionario ingeniero Robert Forward en la década de 1970. Más recientemente, ha habido estudios detallados por parte de P. Lubin, J. Benford y otros. Y el Starshot Project, financiado por la Breakthrough Foundation, de Yuri Milner, está estudiando seriamente si una sonda del tamaño de una oblea se podría acelerar al 20 % de la velocidad de la luz, con lo que alcanzaría las estrellas más cercanas en un plazo de veinte años. <<

[55] Unas buenas introducciones al tema son las de Jim Al-Khalili, ed., *Aliens: The World's Leading Scientists on the Search for Extraterrestrial Life*, Picador, Nueva York, 2017, y Nick Lane, *The Vital Question: Why Is Life the Way It Is?*, W. W. Norton, Nueva York, 2015 (hay traducción castellana: *La cuestión vital. ¿Por qué la vida es como es?*, Ariel, Barcelona, 2016). <<

[56] Es decir, escucha avanzada. (*N. del t.*) <<

[57] Existe una enorme literatura sobre púlsares, pero una visión general la ofrece Geoff McNamara, *Clocks in the Sky: The Story of Pulsars*, Springer, Nueva York, 2008. <<

[58] Las emisiones rápidas de radio se estudian de manera intensiva, y las ideas cambian rápidamente. La mejor referencia es Wikipedia, <[https://en.wikipedia.org/wiki/Fast\\_radio\\_burst](https://en.wikipedia.org/wiki/Fast_radio_burst).> <<

[59] Una biografía de Conway es la de Siobhan Roberts, *Genius at Play: The Curious Mind of John Horton Conway*, Bloomsbury, Nueva York, 2015. <<

[60] *Game of Life.* (N. del t.) <<



[61] Este ensayo puede encontrarse en Eugene Wigner, *Symmetries and Reflections: Scientific Essays of Eugene P. Wigner* Indiana University Press, Bloomington, 1967. <<

[62] La cita es de un artículo clásico de 1931 de Paul Dirac titulado «Quantised Singularities in the Electromagnetic Field», *Proceedings of the Royal Society A*, 133 (1931), p. 60. <<

[63] Una relación excelente de este descubrimiento y de su contexto lo ofrece Govert Schilling en *Ripples in Spacetime*, Belknap Press of Harvard University Press, Cambridge (MA), 2017. <<

[64] Freeman Dyson, «Time without End: Physics and Biology in an Open Universe», *Reviews of Modern Physics*, n.º 51 (1979), pp. 447–460. <<

[65] Martin Rees, *Before the Beginning: Our Universe and Others*, Basic Books, Nueva York, 1997 (hay traducción castellana: *Antes del principio. El cosmos y otros universos*, Tusquets, Barcelona, 1999). <<

[66] Secretario de Defensa de los Estados Unidos en varias administraciones.  
(*N. del t.*) <<

[67] Trenes de levitación magnética. (*N. del t.*) <<

[68] David Deutsch, *The Beginning of Infinity: Explanations That Transform the World*, Viking, Nueva York, 2011. <<



[69] Darwin en una carta a Asa Gray escrita el 22 de mayo de 1860. Darwin Correspondence Project, Cambridge University Library. <<

[70] William Paley, *Evidences of Christianity* (1802). <<

[71] Algunas partes de esta sección aparecieron primero en el capítulo de Martin J. Rees, «Cosmology and the Multiverse», en *Universe or Multiverse*, ed. Bernard Carr, Cambridge University Press, Cambridge, 2007. <<

[72] John Polkinghorne, *Science and Theology*, SPCK/ Fortress Press, Londres, 1995 (hay traducción castellana: *Ciencia y teología. Una introducción*, Sal Terrae, Bilbao, 2000). <<

[73] E. O. Wilson, *Letters to a Young Scientist*, Liveright, Nueva York, 2014 (hay traducción castellana: *Cartas a un joven científico*, Debate, Barcelona, 2014). <<

[74] La obra clave de Karl Popper sobre el método científico es *The Logic of Scientific Discovery*, Routledge, Londres, 1959 (hay traducción castellana: *La lógica de la investigación científica*, Tecnos, Madrid, 1962), una traducción de la versión alemana original publicada en 1934. En los años transcurridos entre una y otra fecha, Popper vio aumentada su reputación por su contribución absolutamente impresionante a la teoría política: *The Open Society and Its Enemies* (hay traducción castellana: *La sociedad abierta y sus enemigos*, Paidós, Barcelona, 1981). <<

[75] P. Medawar, *The Hope of Progress*, Anchor Press, Garden City (NY), 1973, p. 69. <<

[76] T. S. Kuhn, *The Structure of Scientific Revolutions*, University of Chicago Press, Chicago, 1962 (hay traducción castellana: *La estructura de las revoluciones científicas*, Fondo de Cultura Económica, México D. F., 1971).  
<<



[77] Un libro muy accesible, *The Meaning of Science*, de Tim Lewens (Basic Books, Nueva York, 2016), ofrece una crítica clara de los puntos de vista de Popper, Kuhn y otros. <<

[78] Gran Conjunto Milimétrico de Atacama. (*N. del t.*) <<

[79] Jared Diamond, *Collapse: How Societies Choose to Fail or Succeed*, Penguin, Nueva York, 2005 (hay traducción castellana: *Colapso. Por qué unas sociedades perduran y otras desaparecen*, Debate, Barcelona, 2006). <<

[80] Lewis Dartnell, *The Knowledge: How to Rebuild Our World from Scratch*, Penguin, Nueva York, 2015 (hay traducción castellana: *Abrir en caso de apocalipsis*, Debate, Barcelona, 2015). Los libros como estos son educativos; seguramente es lamentable que muchos de nosotros ignoremos las tecnologías básicas de las que dependemos. <<

[81] Manifestaciones recientes, principalmente en los países anglosajones, contra los recortes presupuestarios y la precariedad laboral de los investigadores. (*N. de t.*) <<

[82] William MacAskill, *Doing Good Better: Effective Altruism and How You Can Make a Difference*, Random House, Nueva York, 2016. <<