



El próximo paso

LA VIDA EXPONENCIAL

El próximo paso

LA VIDA EXPONENCIAL

BBVA

 **OpenMind**



Un reciente estudio de la Universidad Rockefeller de Nueva York, dirigido por el profesor Alipasha Vaziri, ha descubierto que el ojo humano es capaz de detectar destellos de luz compuestos por un único fotón

Prólogo

Este libro, *El próximo paso: la vida exponencial* es ya el noveno título de la colección anual que BBVA dedica al análisis y la divulgación de cuestiones fundamentales de nuestro tiempo.

BBVA comenzó esta colección de libros en 2008, en paralelo a la primera edición de los Premios Fronteras del Conocimiento, que otorga la Fundación BBVA. A la vista de las reacciones positivas ante los primeros títulos, en 2011 creamos OpenMind (www.bbvaopenmind.com), una comunidad *online* para generar y difundir conocimiento en beneficio de la sociedad. OpenMind cubre un amplio espectro de materias: ciencia, tecnología, economía, medio ambiente y humanidades, con el objetivo último de ayudar a las personas a entender los principales fenómenos que están afectando a nuestras vidas y configurando nuestro futuro.

Además de los contenidos de los libros que editamos cada año, OpenMind publica artículos, *post*, reportajes y material audiovisual, como infografías y vídeos; todos ellos, disponibles de forma absolutamente gratuita en español y en inglés.

Más de doscientos autores y colaboradores, en los campos de la investigación, la creación artística y la divulgación, participan en la iniciativa OpenMind. Y sus usuarios pueden participar, compartiendo sus ideas, reflexiones e inquietudes. En 2016, 2,5 millones de usuarios de la web y casi 100.000 seguidores de OpenMind en las redes sociales están ayudando con su participación a dar vida a la Comunidad OpenMind.

En nuestros libros anteriores, repasamos cuestiones como las fronteras de la ciencia, la globalización, la innovación, las cuestiones éticas de nuestro tiempo, los cambios que la tecnología está impulsando en nuestro modo de vivir y de trabajar. El libro del año pasado lo dedicamos al proyecto de integración europea, que atraviesa un periodo crítico, cuya superación es fundamental no solo para el futuro de los ciudadanos de los países miembros de la UE, sino para la consolidación de un entorno global más próspero y estable.

Este año volvemos a tratar la cuestión que posiblemente constituya la espina dorsal de OpenMind: el avance científico y sus aplicaciones tecnológicas como motores del cambio para la especie humana.

El próximo paso: la vida exponencial presenta una visión, forzosamente parcial y esquemática, del potencial de las llamadas «tecnologías exponenciales» y sus implicaciones económicas, sociales, medioambientales, éticas e, incluso, ontológicas.

La idea fundamental que recorre el libro es que la humanidad se encuentra en los inicios de una revolución tecnológica de desarrollo acelerado, en comparación con otras anteriores, y de un alcance tal que va a generar transformaciones que solo comenzamos a imaginar.

Porque las tecnologías que están emergiendo van a cambiar —están cambiando ya— lo que parecían constantes fundamentales de la naturaleza humana: hoy parece posible mejorar drásticamente la memoria de las personas, sus procesos cognitivos, sus capacidades físicas e intelectuales, y aumentar la longitud de su vida hasta extremos que pueden cambiar nuestro

concepto de mortalidad. Junto con las inmensas posibilidades que todo esto supone, plantea también incógnitas muy relevantes para la especie humana.

Una vez más, hemos tenido la fortuna de contar con una veintena de autores, todos ellos figuras de referencia de ámbito global en sus respectivos campos, a los que quiero agradecer sus magníficas contribuciones a este libro y su respaldo a nuestro proyecto.

Los avances recientes y las perspectivas de desarrollo en las biociencias, la genética, en la robótica y en la inteligencia artificial, y en la construcción de esa red global de sensores interconectados que se ha dado en llamar «internet de las cosas» son los temas que abren este libro, en una perspectiva que no se limita al ámbito científico-técnico, sino que se extiende a otras vías de generación y transmisión de conocimiento, como el arte o los propios medios de comunicación.

Los artículos siguientes se dedican a las implicaciones de estos desarrollos. Los avances científicos y tecnológicos ofrecen increíbles posibilidades de aumento de la renta y el bienestar, pero también conllevan enormes riesgos, que van desde la posibilidad de un crecimiento drástico del desempleo y la desigualdad, o de presiones insostenibles sobre los sistemas de protección social, hasta amenazas catastróficas para el planeta y para la supervivencia de nuestra especie.

Sin embargo, la propia tecnología nos ofrece nuevas y mejores posibilidades para conjurar estos riesgos. Orientar el desarrollo científico y tecnológico hacia la mejora efectiva de las condiciones de vida de todos, y hacia la sostenibilidad, exige una actualización de nuestros esquemas éticos que nos ayude a actuar de forma responsable en un entorno distinto de todo lo que hemos conocido y rápidamente cambiante. Un entorno en el que se abren perspectivas absolutamente nuevas para la especie humana, como la transición hacia una «era poshumana» donde las personas, con capacidades enormemente aumentadas, convivan con «inteligencias artificiales» superiores a la humana y capaces de reproducirse autónomamente generando descendencia aún más inteligente —lo que se ha llamado «la singularidad»—. O la posibilidad, cada vez más cercana, de la expansión de los humanos —o poshumanos— fuera de la Tierra y el contacto con otras inteligencias en regiones distintas del universo.

Francisco González
Presidente BBVA

8—26

Revertir el envejecimiento mediante la reparación de daños moleculares y celulares

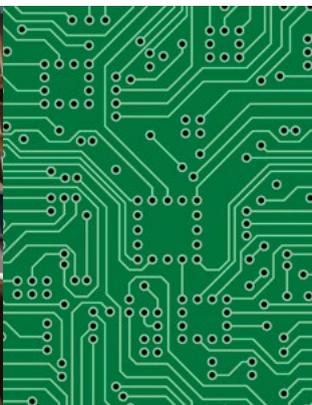
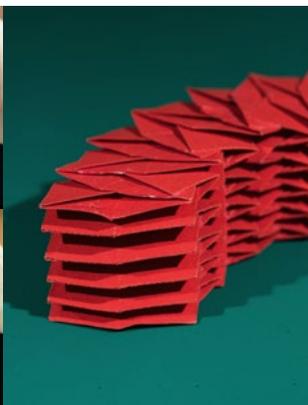
AUBREY D. N. J. DE GREY



45—74

El cerebro sensorial aumentado. Cómo conectarán los humanos con el internet de las cosas

JOSEPH A. PARADISO



27—44

La robótica, los materiales inteligentes y su impacto futuro para la humanidad

JONATHAN ROSSITER

75—98

El futuro de la comunicación humano-máquina: el test de Turing

KEVIN WARWICK Y HUMA SHAH

212—236

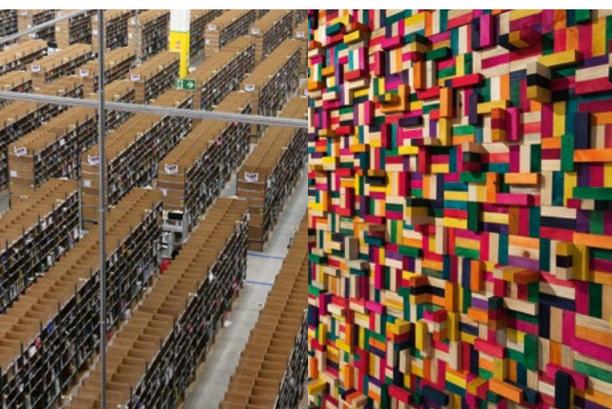
El próximo paso en finanzas: la banca exponencial

FRANCISCO GONZÁLEZ

258—273

Secuenciación completa del genoma. Esfuerzos a gran escala

STEVEN MONROE LIPKIN



193—211

Avance tecnológico: riesgos y desafíos

DARRELL M. WEST

237—257

Pasado, presente y futuro del dinero, la banca y las finanzas

CHRIS SKINNER

274—293

Ingeniería humana para frenar el cambio climático

S. MATTHEW LIAO

99—123

**La inteligencia artificial
y las artes. Hacia una
creatividad computacional**
RAMÓN LÓPEZ DE MÁNTARAS



140—158

**Entornos aumentados y
nuevos medios digitales**
JAY DAVID BOLTER Y
MARIA ENGBERG



175—192

**Inteligencia artificial
de beneficios probados**
STUART RUSSELL

124—139

**El papel del artista en la evolución
de la realidad aumentada**
HELEN PAPAGIANNIS

160—174

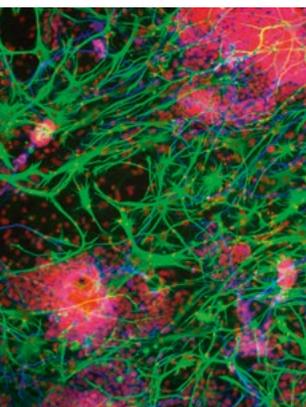
**Cuando los robots gobiernen
la Tierra: el legado humano**
ROBIN HANSON

294—312

**Progreso neurotecnológico.
Necesidad de una neuroética**
JAMES GIORDANO

344—371

**Imponderables tecnológicos:
riesgo existencial y una humanidad
en transformación**
SEÁN Ó HÉIGEARTAIGH



313—343

**Hiperhistoria, la aparición de
los sistemas multiagente (SMA)
y el diseño de una infraética**
LUCIANO FLORIDI

372—396

**Viajes interestelares
y poshumanos**
MARTIN REES



**Revertir el
envejecimiento
mediante la reparación
de daños moleculares
y celulares**

AUBREY D. N. J. DE GREY

Imagen de apertura:
Distintos retratos de la longeva científica italiana Rita Levi Montalcini (1902-2012), neuróloga y Premio Nobel de Medicina de 1986 (c. 2000)



Aubrey D. N. J. de Grey
SENS Research Foundation, Mountain View,
California, EEUU

Aubrey de Grey es gerontólogo médico en Cambridge, Reino Unido, y Mountain View, California, y científico jefe de la SENS Research Foundation, una organización biomédica sin ánimo de lucro con sede en California que realiza y financia investigaciones dedicadas a combatir el proceso de envejecimiento. Es editor jefe de *Rejuvenation Research*, la revista especializada en intervención en el envejecimiento revisada por pares de mayor influencia mundial. Es miembro de la Gerontological Society of America y la American Aging Association y forma parte de los comités de redacción y asesores de numerosas publicaciones y organizaciones.

Desde los albores de la medicina, el envejecimiento ha sido el principal desafío de la comunidad médica. Los tres enfoques empleados para superarlo —tratar factores de mala salud relacionada con la edad como enfermedades curables, extrapolar a partir de diferencias entre especies en cuanto a tasa de envejecimiento y emular la prolongación de la vida que provoca el ayuno en especies de vida breve— han fracasado. La SENS Research Foundation encabeza una «cuarta edad» de la investigación del antienvjecimiento. Lo que sigue es un resumen del enfoque tipo «divide y vencerás» a la hora de devolver a un cuerpo la estructura molecular y celular de un adulto joven, posponiendo así en gran medida todos los síntomas asociados a las enfermedades y a la discapacidad en la vejez.

ANTECEDENTES. ¿POR QUÉ SIGUE RESISTIÉNDOSE EL ENVEJECIMIENTO A LA INTERVENCIÓN MÉDICA?

El control médico del envejecimiento es probablemente el sueño más antiguo de la humanidad..., y desde luego su principal problema ahora mismo. Sin embargo, lamentablemente, los progresos obtenidos son pobres. La historia de nuestros intentos por controlar el envejecimiento se resume en una sucesión de pasos equivocados, de enfoques mal orientados y (en retrospectiva) erróneos que nunca tuvieron posibilidades de éxito y que pueden resumirse con tres palabras: enfermedad, designio y privación. Y lo peor es que ni siquiera han sido secuenciales; los primeros han sobrevivido a la llegada de los siguientes.

El falso amanecer del «envejecimiento como enfermedad», también conocido como medicina geriátrica, descansa en la suposición de que las enfermedades de la vejez son inherentemente susceptibles de ser curadas con el mismo tipo de enfoque médico que las enfermedades prevalentes de la juventud, es decir, las infecciones. Surge de la observación de que personas diferentes contraen enfermedades distintas durante la vejez, lo mismo que personas diferentes contraen infecciones distintas, y de ahí se infiere que la misma clase de estrategia empleada con las segundas funcionará con las primeras, lo que se traduce en atacar los síntomas de la enfermedad. Esto resulta descabellado si tenemos en cuenta que las dolencias de la vejez son consecuencia de la acumulación de daños autoinfligidos al cuerpo, mientras que las infecciones proceden de fuera, y por lo tanto pueden ser expulsadas por completo! Pero no ha impedido —y sigue sin impedir— a la humanidad gastar miles de



millones de dólares en investigaciones dirigidas a lograr este objetivo tan manifiestamente quijotesco. El hombre prefiere, y con razón, creer que es posible. Al parecer también prefiere creer que estas enfermedades son «curables» y por mucha lógica que se le presente en contra no cambia de opinión.

El falso amanecer de «envejecer como designio» se produjo hace alrededor de un siglo, quizá en parte como resultado de la admisión por parte de algunas personas del argumento anteriormente expuesto. Empezó con la propuesta de August Weismann de que el envejecimiento obedece a un propósito evolutivo, una idea seductora que sobrevivió en su formulación inicial durante varias décadas a pesar de ser inherentemente circular (en esencia, Weissmann decía que envejecer es algo seleccionado porque existe, y viceversa) y que perdura para un pequeño sector de la comunidad científica en una formulación más sofisticada (por lo común expresada en términos de inteligencia evolutiva o «evolubilidad»). Pero ese no ha sido su legado principal. A principios del siglo XX dio lugar a un enfoque que no se apoya en la idea de que existen genes cuya función seleccionada es acelerar el declive funcional del organismo, sino en la de que los genes que determinan la variación entre especies (y la variación menor, pero no por ello insignificante, entre individuos de la misma especie) son más bien pocos en número, y por tanto es realista intentar perfeccionar los miembros de una especie determinada, como el *Homo sapiens*, para extender su esperanza de vida saludable. Es fácil ver cómo la segunda idea está inspirada en la primera, pero por desgracia no *depende* de ella (porque se sostiene igualmente si los genes en cuestión son genes anti-envejecimiento en lugar de pro-envejecimiento), y por tanto su rechazo por parte de la mayoría de los gerontólogos no se produjo como consecuencia lógica del «envejecimiento programado».

De nuevo, sin embargo, debemos hacer la pregunta clave: ¿tiene sentido en realidad la idea de «envejecimiento por designio» como base para los esfuerzos médicos por retrasar el envejecimiento asociado a la mala salud? ¿Es siquiera remotamente compatible con lo que sabemos sobre envejecimiento? De nuevo, la dolorosa respuesta es no. Precisamente por las mismas razones por las que sabemos que el envejecimiento no es programado, también sabemos que es inherentemente caótico y multifactorial. Mecanismos distintos causan daños distintos y caminos genéticos distintos se dedican a ralentizar esos mecanismos y, por tanto, a posponer la edad a la que cada tipo de daño alcanza la proliferación patogénica. Y puesto que la presión selectiva se impone en esos caminos mediante un mecanismo común, a saber, la relación entre la función de un individuo y su capacidad de contribuir a la generación siguiente, están destinados inexorablemente (excepto en casos especiales que he agrupado bajo el fenómeno de «pleiotropía protagónica») a descender a niveles de eficacia que conducen a las patologías correspondientes a más o menos la misma edad. Así, no existe ninguna posibilidad de conseguir una ralentización sustancial de la acumulación de todos esos tipos de daños perfeccionando un pequeño número de genes. Sin embargo, al igual que ocurre con la medicina geriátrica, la fe en la existencia de una suerte de «panacea» esquiva persiste en la mente de un deprimente número de biólogos.

¿Pero es eso malo? ¿Piensan así los biólogos cuya principal área de estudio es la biología del envejecimiento? No del todo. Sin duda muchos biogerontólogos eligen su área de investigación por motivos que así lo sugieren, pero debemos recordar que, al igual que ocurre en cualquier campo de la ciencia, la mayoría de los investigadores actúan movidos por la curiosidad antes que por el potencial traslacional de sus investigaciones, y no seré yo quien





recuerde que la investigación impulsada por la curiosidad carece de valor. Así que no condeno a esos investigadores de la manera en que condeno a la geriatría. Y los biogerontólogos que sí piensan en términos de potencial de aplicación ya admitieron la lógica anteriormente expuesta en la década de 1960 más o menos.

Hasta aquí bien..., en cierto modo. Durante las décadas de 1970 y 1980 todo esto tuvo una desventaja de lo más deprimente. Casi todos los gerontólogos de enfoque traslacional respondieron a esta admisión convirtiéndose en otra clase de gerontólogos, los motivados por la curiosidad, hasta tal punto que se volvió imposible sugerir (ni públicamente, ni en solicitudes de becas, etcétera) la posibilidad de un aplazamiento del envejecimiento sin dañar de forma irreparable la credibilidad de uno. Pero al menos estaban siendo realistas.

Hasta que llegó... el tercer falso amanecer. Por «privación» me refiero, tal y como espero que hayan adivinado, a la restricción calórica (RC), una intervención que ya se demostró en la década de 1930 que alargaba las vidas de ratones y ratas hasta el 50%. También se reveló que tenía un efecto proporcional (y anatómicamente) mucho más drástico en nematodos, que tienen un desarrollo radicalmente distinto cuando se les priva de alimento en una etapa concreta. Visto en retrospectiva, resulta curioso por tanto que, dados todos estos datos de sobra conocidos, la comunidad biogerontológica se mostrara entonces muy escéptica primero y muy animada después por informes de finales de la década de 1980 y principios de la de 1990 según los cuales el mismo efecto, solo que a una magnitud ligeramente menor, podía conseguirse en nematodos por medios genéticos. Pero con independencia de la historia, el hecho es que el adjetivo «animada» es sin duda un eufemismo.

A día de hoy, la investigación gerontológica biomédica está dominada por la búsqueda de maneras idóneas de emular los efectos de la restricción calórica por medios genéticos o, más recientemente, farmacológicos.

¿Por qué es esto un tercer falso amanecer? Porque salta a la vista que su potencial biomédico verdadero es, y lleva tiempo siéndolo, casi nulo. La razón de que esto sea tan obvio surge de la combinación de dos puntos. Primero, casi sin excepción (la única excepción «conocida» es de hecho probablemente incorrecta, aunque merece investigarse más a fondo), ninguna intervención genética o farmacológica en ninguna especie ha superado nunca el rendimiento de la RC en esa misma especie cuando se ha iniciado a la misma edad (exactamente lo que cabía esperar), puesto que la prolongación de la vida lograda por la RC y su emulación debe estar mediada por los mismos caminos genéticos, unos caminos cuyo efecto es el que es, y punto. Y segundo, el rendimiento de

la RC misma varía de forma inversa con la longevidad no relacionada con la RC de la especie: especies más longevas se benefician mucho menos en proporción a su esperanza de vida y, de hecho, no se benefician gran cosa en términos de tiempo absoluto. Esto también era de esperar, puesto que la presión selectiva que da lugar a los caminos que median en la respuesta a la RC surge de la frecuencia de las hambrunas, que es independiente de la longevidad de los organismos que las sufren. Puesto que las hambrunas prolongadas son menos frecuentes que las breves, la predicción está clara. Y si sumamos todas estas cosas, la conclusión también es clara: emular la RC no pospondrá de manera significativa el envejecimiento humano.

¿Pero se deduciría esto de un vistazo a las solicitudes de becas de investigación que subvencionan en la actualidad el Instituto Nacional del Envejecimiento de Estados Unidos o sus homólogos de todo el mundo? Pues no. Si excluimos, tal y como hemos expuesto, las ayudas centradas en ampliar nuestra comprensión del envejecimiento antes que en hacer algo al respecto, la abrumadora mayoría contempla alguna clase de enfoque relacionado con emular la RC. Al igual que con otros amaneceres falsos, hay quienes siguen aferrados a este concepto a pesar de la lógica aplastante que sugiere lo contrario, solo porque sus defensores han incurrido ya en tantos costes en términos de inversión intelectual que su única manera de sobrevivir es continuar aprobándose mutuamente becas de investigación.

LA CUARTA VÍA: REPARACIÓN DE DAÑOS

En este siglo, a pasos pequeños y con mucho esfuerzo, las cosas están cambiando. En lo que queda de este ensayo describiré los avances a día de hoy a la hora de poner en práctica el enfoque para combatir el envejecimiento que presenté por primera vez hace unos quince años, con el nombre de «Estrategias para una Senescencia Negligible Ingenierizada» (SENS, por sus siglas en inglés). Gran parte de estos progresos se han producido bajo el liderazgo de la organización sin ánimo de lucro creada para este fin, la Fundación de Investigación SENS.

Puede parecer curioso que una organización sin fines de lucro dedicada en parte a mejorar la conciencia pública adopte como nombre una expresión tan técnica como SENS. De hecho, hemos introducido recientemente el término, más claro para los legos, de «biotecnología del rejuvenecimiento» para referirnos a las tecnologías requeridas para implementar SENS. «Rejuvenecimiento», sin embargo, no es un concepto fácilmente cuantificable, y la frase original sigue siendo la descripción más precisa de nuestro objetivo.



«Senescencia» aquí se refiere a un fenómeno actuarial, la tendencia de los individuos de una población a sufrir una tasa creciente de enfermedad y de mortalidad en relación (por lo común exponencial) a su edad cronológica.

«Negligible» se usa en sentido estadístico: consideramos negligible un nivel de senescencia si no se puede demostrar estadísticamente una contribución a la mortalidad relacionada con la edad (como, por ejemplo, encuentros desafortunados con vehículos a motor). Aceptamos que se trata de un blanco móvil; es posible observar un nivel no negligible de senescencia en la misma población después de mejoras en los datos disponibles o en los métodos de análisis, lo que requerirá ulteriores adaptaciones del enfoque terapéutico. De hecho, es probable que esto suceda varias veces.

Por último, con «ingenierizada» queremos indicar que este estado se consigue mediante la aplicación deliberada de terapias biomédicas, y que no es la situación normal (que se observa en, por ejemplo, Hydra, donde la regeneración continuada parece desembocar en una total falta de correlación entre edad y tasa de mortalidad, aunque la preservación indefinida del potencial reproductivo es más controvertida).

Nuestro objetivo está por tanto definido sin ambigüedad posible, ya que buscamos métodos para convertir una población que experimenta un nivel de senescencia no negligible en una que experimenta un nivel negligible.

A la mayoría de los lectores, este objetivo, la eliminación exhaustiva de la degeneración relacionada con la edad, les parecerá disparatado. Sin duda ha sido un logro al que ha aspirado la humanidad al menos desde que tenemos constancia escrita, con escasos resultados. Sin embargo, existen buenas razones para pensar que puede ser algo más fácil de conseguir que una «simple» desaceleración del proceso de envejecer, de manera que el aumento de mortalidad relacionada con la edad descienda y la vida humana se alargue modestamente. En este ensayo describo las razones.

Para entender cómo podría «ingenierizarse» el objetivo de una senescencia negligible es útil considerar una situación en la que el ingenio y la perseverancia humanas hayan alcanzado un resultado análogo. Los vehículos a motor experimentan un proceso de desgaste por el uso similar en esencia al del envejecimiento de los organismos: la pintura se descascarilla, los cristales de las ventanillas se resquebrajan, los conductos se oxidan, etcétera. Sin embargo, como muy bien saben los dueños de coches antiguos, es completamente posible mantener uno operativo, prístino incluso, durante un periodo de tiempo esencialmente indefinido.

Y esto se consigue no previniendo el desgaste —instintivamente podemos saber que hacer algo así de manera perfecta es imposible—, sino reparando el daño producido a un ritmo tal que asegure que el funcionamiento de la máquina no se pone nunca en peligro y nunca de manera irreversible.

Por supuesto, la analogía es inexacta; los cuerpos humanos son mucho más complejos que los coches, y aún estamos muy lejos de comprender cómo están contruidos y los procesos que contribuyen a su desgaste. Por suerte, fijarnos con atención en cómo envejecer conduce a la debilidad, revela que nuestra ignorancia no tiene por qué impedirnos actuar.

El envejecimiento puede describirse como un proceso de tres etapas. En la primera, los procesos metabólicos esenciales para la vida producen toxinas, un efecto secundario inevitable de trabajar con sustancias químicas reactivas. En la segunda, una pequeña cantidad del daño producido por esas toxinas no se puede eliminar de los sistemas endógenos de reparación del





«El hombre es un compuesto químico y la vejez resulta de una autointoxicación.»

PARACELSO (1493-1541)
Alquimista, médico y astrólogo suizo

La juventud (2015), Paolo Sorrentino

cuerpo, y por consiguiente se acumula con el paso del tiempo. En la tercera fase, la acumulación de daños causa patologías relacionadas con la edad, ya sea de manera directa —interfiriendo con el metabolismo normal— o indirecta, a menudo donde un proceso de reparación normalmente benévolo causa daños colaterales debidos a una sobreestimulación maladaptativa.

Este modelo («el metabolismo causa daños que causan patologías») nos permite tener bastante más claros los requerimientos para intervenir en el proceso de envejecimiento.

A diferencia de los procesos dinámicos de metabolismo y patología —de los que sabemos tan poco, y en los que una intervención desencadena siempre una cascada de repercusiones—, la acumulación de daños constituye un blanco relativamente estable. Esto quiere decir que puede no estar claro si un tipo concreto de daño es patológico (en conjunto), pero su ausencia en un individuo de veinte años indica que no se requiere para una vida sana. A la inversa, está claro que la suma total de tipos de daños sí es patológica, puesto que los individuos de cincuenta años tienen considerablemente menos tiempo por delante que los de veinte, y la única diferencia estática entre los dos grupos es la cantidad de daños acumulados presentes. (Hay diferencias dinámicas, donde el cuerpo reacciona de forma maladaptativa a la presencia de daños, pero la naturaleza profundamente homeostática de la fisiología nos hace pensar que esto se autocorregirá una vez que se elimine el estímulo que causa esa respuesta maladaptativa.)

Aceptar las implicaciones de este modelo (que replica las curvas de mortalidad inducidas por la edad de forma muy prometedora) nos lleva al enfoque SENS; al identificar y reparar todo el daño acumulado durante el envejecimiento, podemos devolver al cuerpo su estado juvenil. En consecuencia, sus procesos metabólicos dinámicos revertirán a su funcionamiento normal y el riesgo de mortalidad no será mayor que el de cualquier otro individuo «joven» equivalente, haya vivido veinte o ciento veinte años. Es más, si nuestro inventario de tipos de daños es lo bastante exhaustivo, podemos repetir este esfuerzo con regularidad y mantenernos indefinidamente por debajo del umbral de la patología. Pero sobre todo podemos hacerlo sin una comprensión exhaustiva de los procesos metabólicos complejos que dan lugar a los daños, ni de los que conducen del daño a la patología. Solo necesitamos un inventario de los tipos de daños que existen, algo que puede obtenerse mediante una comparación entre individuos jóvenes y mayores.

¿CUÁLES SON LOS DAÑOS ASOCIADOS AL ENVEJECIMIENTO?

Por fortuna, parece que todos los daños relacionados con la edad que se acumulan en el cuerpo humano pueden agruparse en siete categorías bien definidas. Para cada una de ellas, la plataforma SENS incorpora un mecanismo de reparación de daños usando biotecnología existente o prolongaciones fácilmente previsibles de esta. A continuación hago un breve resumen de estas categorías y de las opciones terapéuticas que existen para su resolución:

Pérdida celular

La categoría de daños más clara es la pérdida (muerte irremplazable) de células, ya sea como resultado de lesiones crónicas o de trauma agudo, mediante la apoptosis, por muerte autófaga de las células o por necrosis. Estas muertes conducen a una atrofia de los tejidos que pone en peligro el funcionamiento de los órganos afectados; ejemplos de esto incluyen la enfermedad de Parkinson, la sarcopenia, la diabetes autoinmune y la presbiacusia, y sus tratamientos pasan



por la introducción de células madre o progenitoras (o la estimulación de la proliferación de progenitoras endógenas), ya sea de manera sistemática, con la ayuda de mecanismos de selección adecuados, o localmente, mediante ingeniería de tejidos.

Resistencia a la muerte celular

A la inversa, la acumulación de cantidades excesivas de células refractarias a la apoptosis homeostática normal también puede ser dañina. El ejemplo más obvio en el contexto de las sociedades occidentales es la obesidad, pero hay manifestaciones más sutiles: el desequilibrio entre linfocitos T anérgicos y vírgenes que caracteriza la inmunosenescencia es un ejemplo claro. El tratamiento es, en este caso, conceptualmente evidente: identificar biomarcadores que seleccionen las células no deseables y enviar fármacos citotóxicos o virus que aseguren su destrucción.

Exceso de proliferación celular

La última (pero sin duda no la menos importante) categoría «celular» tiene que ver con los daños al ADN genómico, tanto en forma de mutación (cambios en la secuencia de pares de bases) como en «mutación epigenética» (cambios en los segmentos que modifican la molécula de ADN e influyen en su transcripción). Por suerte se trata de un área en la que la evolución nos ha hecho ya casi todo el trabajo duro. Desde la aparición de los vertebrados (al menos), el problema más grave originado por la mutación ha sido el cáncer, que tiene la capacidad de matar un organismo si una única célula adquiere carga mutacional suficiente, mientras que cualquier otra mutación solo se vuelve letal, generalmente, si afecta a una proporción sustancial de las células de un tejido determinado. Los mecanismos de corrección desarrollados para prevenir el cáncer son, por tanto, más que suficientes para mantener las mutaciones no cancerosas bajo control. Así, esta categoría de daños estrictamente molecular se trata mejor, de hecho, como si fuera celular.

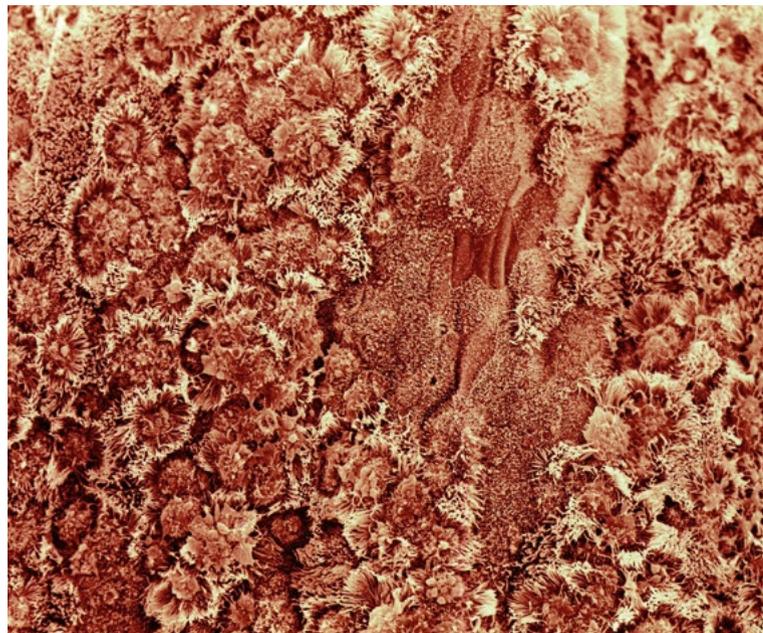
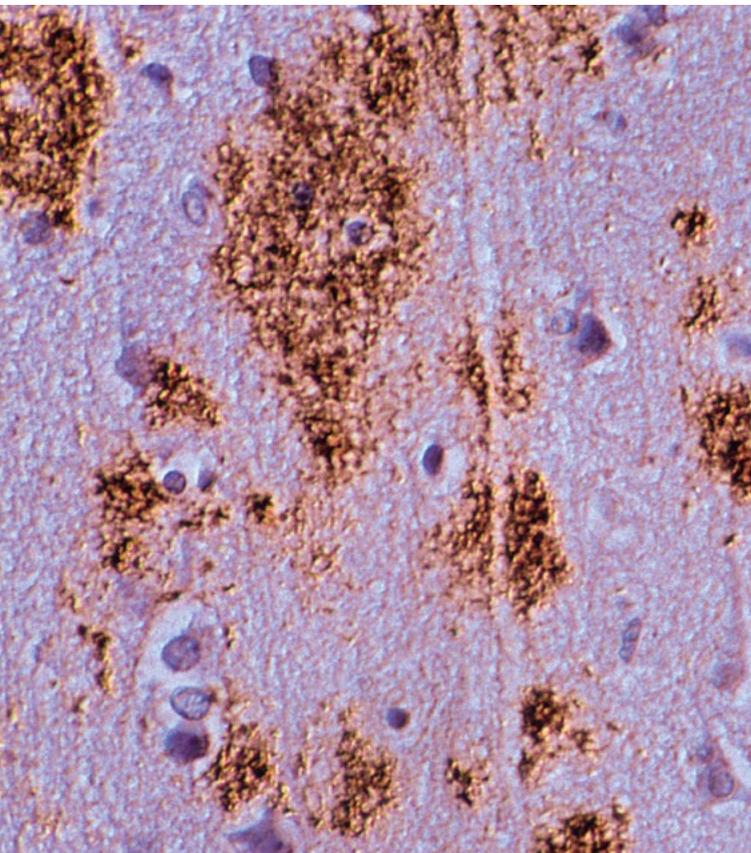
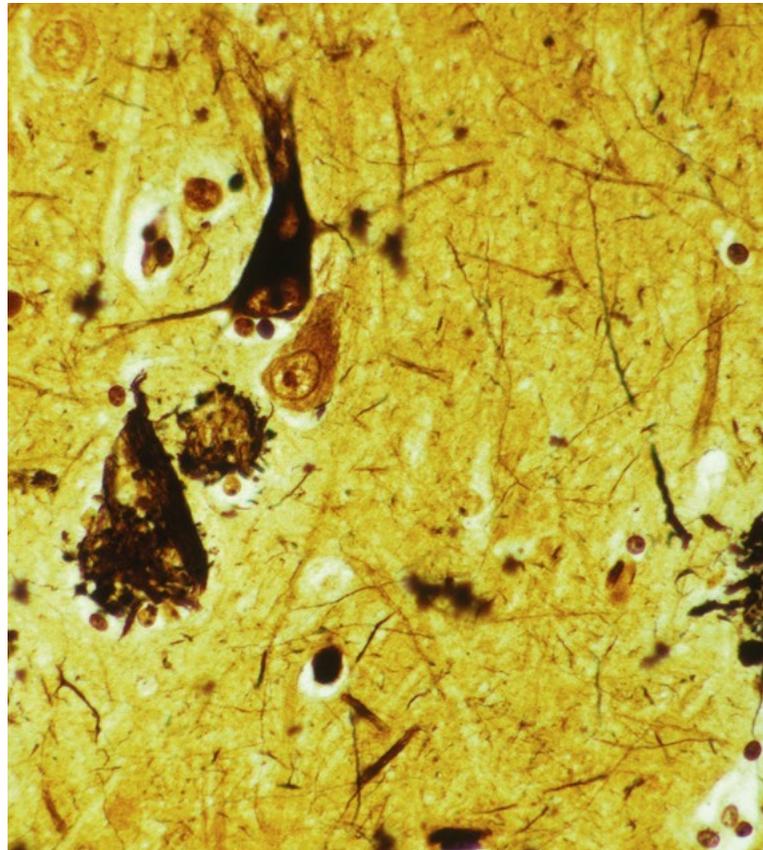
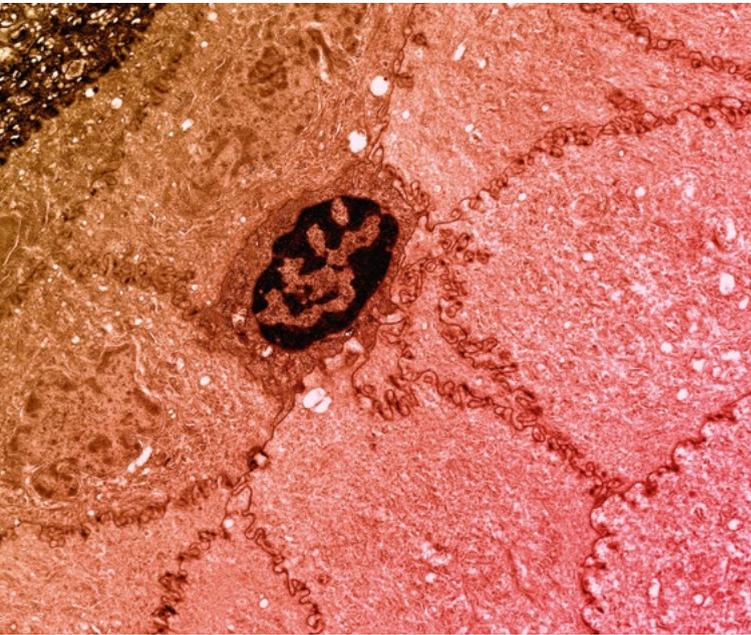
Por supuesto que el cáncer en sí continúa siendo un problema muy real. La solución SENS —WILT, un acrónimo de «Whole-body Interdiction of Lengthening of Telomeres» (intercepción del alargamiento de los telómeros en todo el cuerpo)— es la única terapia anticáncer genuinamente universal que se ha propuesto hasta la fecha. WILT es un enfoque doble que incluye el borrado (no la mera inactivación) de la telomerasa y del AAT (alargamiento alternativo de los telómeros; ALT, por sus siglas en inglés) en todo el cuerpo, evitando así que cualquier cáncer de nueva formación crezca lo bastante como para ser mortal, acompañado de un resembrado cada diez años (más o menos) de nuestras reservas de células madre de regeneración rápida de tejidos usando células cuyos telómeros han sido alargados *ex vivo*. Por ambicioso que esto resulte, la naturaleza exhaustiva de WILT, en caso de que pueda implementarse, no está en duda, de manera que sigue siendo un «tratamiento de último recurso» que no sería inteligente despreciar hasta que se desarrollen terapias más simples de eficacia comparable.

Las cuatro categorías restantes de daño son moleculares antes que celulares; dos son intracelulares y dos extracelulares.

«Basura» intracelular

Aunque los leucocitos son, por lo general, muy eficaces a la hora de detectar (particularmente mediante la respuesta a proteínas desplegadas) y reciclar biomoléculas dañadas o sobrantes, hay algunas excepciones: sustancias que son genuinamente refractarias a la degradación





De izquierda a derecha: micrografía electrónica que muestra la superficie de células epiteliales en una córnea humana, fotomicrografía del córtex cerebral de un paciente con enfermedad de Alzheimer, micrografía electrónica de barrido de un bronquio humano y fotomicrografía de una sección del neocórtex de una mujer de ochenta y seis años con enfermedad de Alzheimer

o a la excreción. La acumulación de «basura» resultante afecta al metabolismo de la célula, en el mejor de los casos socavando su funcionamiento normal; en el peor, provocando su muerte. La acumulación de lipoproteínas en placas arterioescleróticas y la fototoxicidad del A2E que produce la degeneración macular seca son dos de los ejemplos mejor estudiados de este mecanismo, que puede tratarse aumentando la maquinaria nativa de degradación introduciendo enzimas nuevas capaces de alcanzar los blancos más recalcitrantes. Estas enzimas tienen que ser introducidas en el lisosoma, «la maquinaria de último recurso de eliminación de residuos».

«Basura» extracelular

No todos los productos de desecho se acumulan dentro de la célula; las tristemente famosas placas amiloides de la enfermedad de Alzheimer, así como los amiloides asociados a la diabetes de tipo II y la amiloidosis sistémica se acumulan en el espacio extracelular. Por fortuna, el cuerpo ya posee un excelente mecanismo para eliminar sustratos no deseados de este compartimento: las células fagocíticas del sistema inmune. Por lo que el problema de la eliminación de la basura se soluciona en esencia desarrollando una vacuna efectiva y segura. (En algunos casos puede ser necesario aplicar los principios de la categoría anterior —la estimulación del lisosoma— para garantizar que las células inmunes sean capaces de degradar por completo las sustancias que consumen.)

Rigidez de los tejidos

Las proteínas comprenden el grueso de la matriz extracelular; en muchos casos estas proteínas se asientan en los primeros años de vida y luego se reciclan muy despacio, si es que se llegan a reciclar, a la edad adulta. La función de los tejidos soportados por estas proteínas —como la elasticidad de la pared arterial— depende de que conserven una estructura molecular adecuada. A medida que pasan los años, esa estructura empieza a peligrar, sobre todo debido al entrecruzamiento inducido por especies reactivas de moléculas, en especial una red de reacciones iniciadas por azúcares en circulación que recibe el nombre colectivo de «glicación». En las arterias, este endurecimiento o rigidez produce presión sanguínea elevada y todas las complicaciones derivadas de esta. Puesto que sucede que estos entrecruzamientos son químicamente distintos de los derivados de enzimas, la estrategia terapéutica es desarrollar fármacos o enzimas capaces de romper estos enlaces cruzados para restaurar la función biofísica original.

Defectos mitocondriales

El ADN mitocondrial (ADNmt) es singularmente vulnerable por estar muy próximo a una intensa fuente de compuestos reactivos (la cadena respiratoria), pero carece de los sofisticados mecanismos de reparación a los que tiene acceso el ADN nuclear. La acumulación de daños en el ADNmt está asociada al envejecimiento, y ligada, tal como cabe esperar cuando un componente celular tan vital está implicado, a una amplia gama de enfermedades degenerativas. Sin embargo, de los cerca de mil componentes proteicos de una mitocondria madura, solo trece están de hecho codificados en el ADNmt, porque los genes restantes se han desplazado, a lo largo de la evolución, al ADN nuclear, desde donde sus productos son translocados eficientemente de vuelta a la mitocondria. La solución en este caso no es reparar los daños de los genes restantes, sino introducir variantes preparadas para la translocación en



el genoma nuclear, una técnica llamada expresión alotópica y con la que se obvia el problema de conservar el ADN mitocondrial.

Debemos subrayar que la formulación de estas siete categorías es descriptiva, no prescriptiva. Sin embargo, el hecho de que no se hayan descubierto nuevas categorías de daño celular desde 1982, a pesar de lo espectacular del progreso en técnicas bioanalíticas, sugiere que las otras categorías se acumulan demasiado despacio como para tener un impacto en la salud dentro del marco temporal de la vida humana.

PROGRESOS RECIENTES

Desde que se propuso el primer enfoque SENS, en 2002, se han hecho progresos notables en todas las principales áreas de investigación. En lo que queda de capítulo resumiré algunos de los hallazgos más apasionantes y recientes, y explicaré cómo contribuyen al desarrollo de biotecnologías de rejuvenecimiento efectivas.

Por qué reciclar salvará algo más que al planeta

Algunos de los indicios recientes más prometedores a favor de una estrategia basada en la eliminación de daños acumulados proceden de experimentos con la autofagia, el proceso por el cual las células reciclan de forma natural proteínas, lípidos e incluso orgánulos enteros. En concreto, se ha demostrado que la autofagia mediada por carabinas (AMC), un proceso que media en la translocación de proteínas portadoras de un patrón específico al lisosoma (ya sea de manera inherente o como consecuencia del despliegue o de una modificación postraslacional para su degradación), disminuye con la edad debido a la presencia menor del receptor de Lamp-2A (membrana proteínica asociada al lisosoma).

Ratones modificados con Lamp-2A inducible en el hígado (donde la disfunción autofaga relacionada con la edad está bien definida) muestran niveles marcadamente bajos de acumulación de proteínas oxidadas y degeneración estructural a los veintidós meses, con una función hepática más próxima a la de un ratón joven (de seis meses) que a sus compañeros de camada usados como control. Sorprendentemente, los ratones transgénicos también mostraron tasas aumentadas de macroautofagia y de la actividad ubiquitina-proteasoma, lo que implica que se da un proceso de retroalimentación positiva entre sistemas de reparación de daño celular.

Reforzar el tráfico de biomoléculas dañadas es, por supuesto, solo una de las maneras de aumentar su tasa de reciclaje. En un trabajo muy reciente con ratones modelo para la enfermedad de Alzheimer, la desinhibición de la proteasa lisosomal catepsina B ha dado como resultado una eliminación drástica de A β (1-42), seguida de una recuperación sustancial de déficits conductuales en múltiples test.

Herramientas, prestadas y encontradas

Por prometedores que sean los enfoques basados en reforzar la maquinaria de reciclado ya existente, hay algunos productos de desecho relacionados con la edad que parecen por completo refractarios a la degradación por parte de las enzimas líticas normales de la célula. Estos blancos de actuación —incluido el bisretinoide tóxico A2E, algunas formas de colesterol oxidado y otras— requieren un método de eliminación cualitativamente distinto.





Una de las primeras cosas observadas en el plataforma SENS fue que muchas de estas sustancias, si bien resistentes a la degradación por parte de células humanas, no se acumulan ni siquiera en suelos altamente enriquecidos con restos humanos. Por tanto, se razonó que debe de existir algún organismo que sea competente a la hora de metabolizarlas. Pronto se identificaron especies bacterianas con estas capacidades, y el proceso de determinar las enzimas implicadas y adaptarlas a formatos de uso terapéutico es una de las grandes ramas de investigación en las que se trabaja actualmente en el Centro de Investigación de la Fundación SENS.

Uno de los avances más recientes ha sido el descubrimiento de anticuerpos catalíticos (aquellos con una actividad hidrolítica directa contra un antígeno particular supuestamente debido a una afinidad mayor con el estado de transición que con el estado fundamental) que actúen contra el amiloide- β . La inmunoterapia directa contra el depósito amiloide supone siempre un escollo durante los ensayos clínicos debido a los efectos secundarios dañinos de inflamación cerebral, un problema especialmente pronunciado en pacientes con enfermedades avanzadas, y por consiguiente con una carga amiloide alta. La inmunoterapia catalítica, por otra parte, evita este escollo, porque la proteína hidrolizada no es secuestrada en una forma proclive a generar una respuesta inmune. Al mismo tiempo, gracias a la alta especificidad del anticuerpo, la estrategia evita los efectos no buscados que se observan con enfoques que tratan hidrólisis amiloide con enzimas convencionales (como la neprilisina).

El mecanismo por el cual los anticuerpos terapéuticos de cualquier tipo atraviesan la barrera hematoencefálica es un campo objeto de activa investigación. Aunque la penetrancia de la inmunoglobulina de clase C (IgC) es muy baja, se ha comprobado que la IgM y los fragmentos FAB traspasan la barrera de forma mucho más efectiva, y, en cualquier caso, siempre se podría ayudar a entrar a un agente de baja penetrancia, pero por lo demás efectivo, manipulando el proceso del transporte mediado por receptor que emplean sustancias como la insulina y la transferrina.



La fundación SENS está patrocinando un proyecto para determinar si puede aplicarse de manera efectiva la tecnología de anticuerpos catalíticos a la amiloidosis cardiaca, que afecta la función cardiaca de hasta el 25% de personas mayores de ochenta años y parece ser la causa de muerte más común en las edades más avanzadas.

Cuando no provee la naturaleza

A la hora de tratar sustancias de desecho recalcitrantes, o enlaces cruzados de proteínas de la matriz extracelular, el desafío es, por lo general, identificar una enzima (o molécula pequeña) capaz de transformar la degradación de una especie particular en una más susceptible a la maquinaria de reciclaje natural del cuerpo. El criterio de referencia para lograr este objetivo dentro de la industria farmacéutica es el cribado farmacológico de amplio rendimiento, que consiste en testar enormes selecciones de candidatos con la esperanza de identificar uno o más con la actividad buscada.

Por muy efectivos que puedan resultar, los cribados de alto rendimiento son, en esencia, una lotería bioquímica. En consecuencia, en ocasiones se argumenta que pueden existir tipos de daño de difícil tratamiento porque el agente requerido para repararlos está ausente de todas las bases de datos de estructuras químicas o quimiotecas, o bien nunca ha sido sintetizado. ¿Supone esto un problema para la exhaustividad del enfoque SENS?

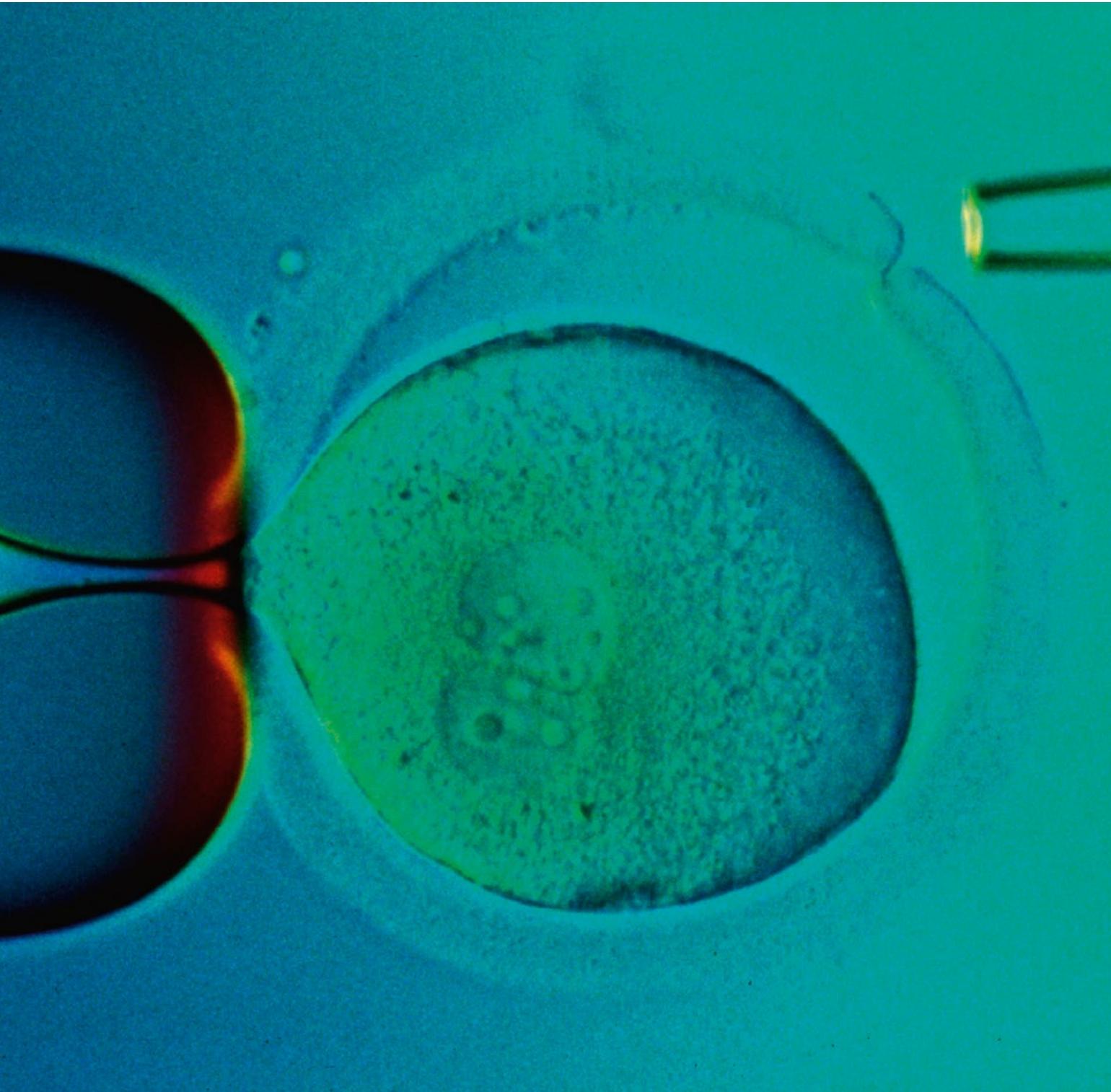
Aunque esta área de investigación está dando aún sus primeros pasos, el diseño por ordenador (y optimización por evolución dirigida) de enzimas capaces de catalizar una reacción arbitraria por órdenes de magnitud múltiples ha demostrado recientemente ser factible. Las aplicaciones de este enfoque en la industria —por no hablar de la medicina— son tan evidentes que su perfeccionamiento parece inevitable. Por tanto, confiamos en que ninguna forma específica de daño químico sea irreparable para siempre.

Partes sueltas y corazones por encargo

Aunque la reparación in situ a nivel celular y molecular es la solución más idónea para los daños relacionados con la edad, no creemos que vaya a ser siempre viable, sobre todo mientras la biotecnología de rejuvenecimiento continúe en pañales. En algunos casos, los daños serán demasiado grandes y heterogéneos para que su reparación sea factible; en otros, la naturaleza molecular exacta del daño puede ser demasiado confusa para que se pueda formular un ataque directo.

Para estos casos existe una solución temporal que debemos buscar en el campo de la ingeniería de tejidos: en lugar de rejuvenecer el órgano existente, trataríamos de reemplazarlo con uno completamente nuevo desarrollado in vitro. Este concepto no tiene nada de novedoso, pero se ha enfrentado a tres grandes impedimentos: en primer lugar, el problema de conseguir una vascularización adecuada para el tejido cultivado; en segundo (y en particular cuando reemplazar el órgano es urgente, como suele ser el caso), los periodos prolongados de crecimiento proliferativo necesarios para alcanzar el tamaño y la funcionalidad de un órgano adulto; y en tercero, la necesidad, cuando se usan células alogénicas o tejido, de tratar al paciente con inmunosupresión de por vida.

Trasplante de células madre embrionarias para curar la anemia de Fanconi



Hay dos métodos nuevos de síntesis de órganos que se muestran prometedores a la hora de superar estas limitaciones. En el primero —la descelularización—, se trata tejido de un donante con una mezcla de detergente y enzima hasta que las células originales y los antígenos del donante desaparecen y dejan un andamiaje vacío y no inmunogénico. Este andamiaje a continuación se incuba durante varios días con células madre/progenitoras del paciente, que lo repueblan y con el tiempo reconstituyen las funciones normales del tejido. Cosa importante, aunque la fase de preparación del andamiaje requiere semanas, puede llevarse a cabo sin conocimiento del receptor; solo la fase, mucho más breve, de repoblación, es específica para cada paciente. Con éxito demostrado hasta el momento en un injerto traqueal de gran envergadura, todo apunta a que el uso de esta técnica se extenderá en un futuro cercano.

La segunda técnica novedosa es la bioimpresión, que consiste en preparar un injerto de casi cualquier forma que se desee depositando células de manera similar al funcionamiento de una impresora de chorro de tinta. La bioimpresión elimina la necesidad de un soporte de donante, y por tanto podría resultar con el tiempo ser más práctica para un uso general. Aunque su aplicación terapéutica está en una fase muy temprana, la perspectiva de un suministro casi ilimitado de órganos altamente similares, ideal para conducir ensayos clínicos en condiciones de seguridad, está atrayendo sustanciales inversiones preclínicas.

Un gramo de prevención

Ya hemos presentado el concepto de expresión alotópica, es decir, transferir los trece genes codificantes de proteína del ADNmt al genoma nuclear, donde se beneficiarán de mecanismos de conservación mejores y de aislamiento de las fuentes más peligrosas de sustancias reactivas. Por supuesto, la descripción más bien concisa que hemos ofrecido solo describe de manera superficial las dificultades técnicas que lleva aparejadas.

Las proteínas en cuestión figuran entre las más hidrófobas de las encontradas en la mitocondria; en consecuencia, una vez plegadas después de la síntesis en el citoplasma, son las más difíciles de desplegar otra vez, un requisito previo a su translocación al otro lado de la membrana mitocondrial interior. Cuando se presentó SENS, se sugirieron dos estrategias complementarias para facilitar la importación. La primera fue la sustitución de residuos aminoácidos altamente hidrófobos por análogos menos hidrófobos; la segunda incluía la introducción de inteínas autoescindibles en las regiones de plegado más firme, evitando que se



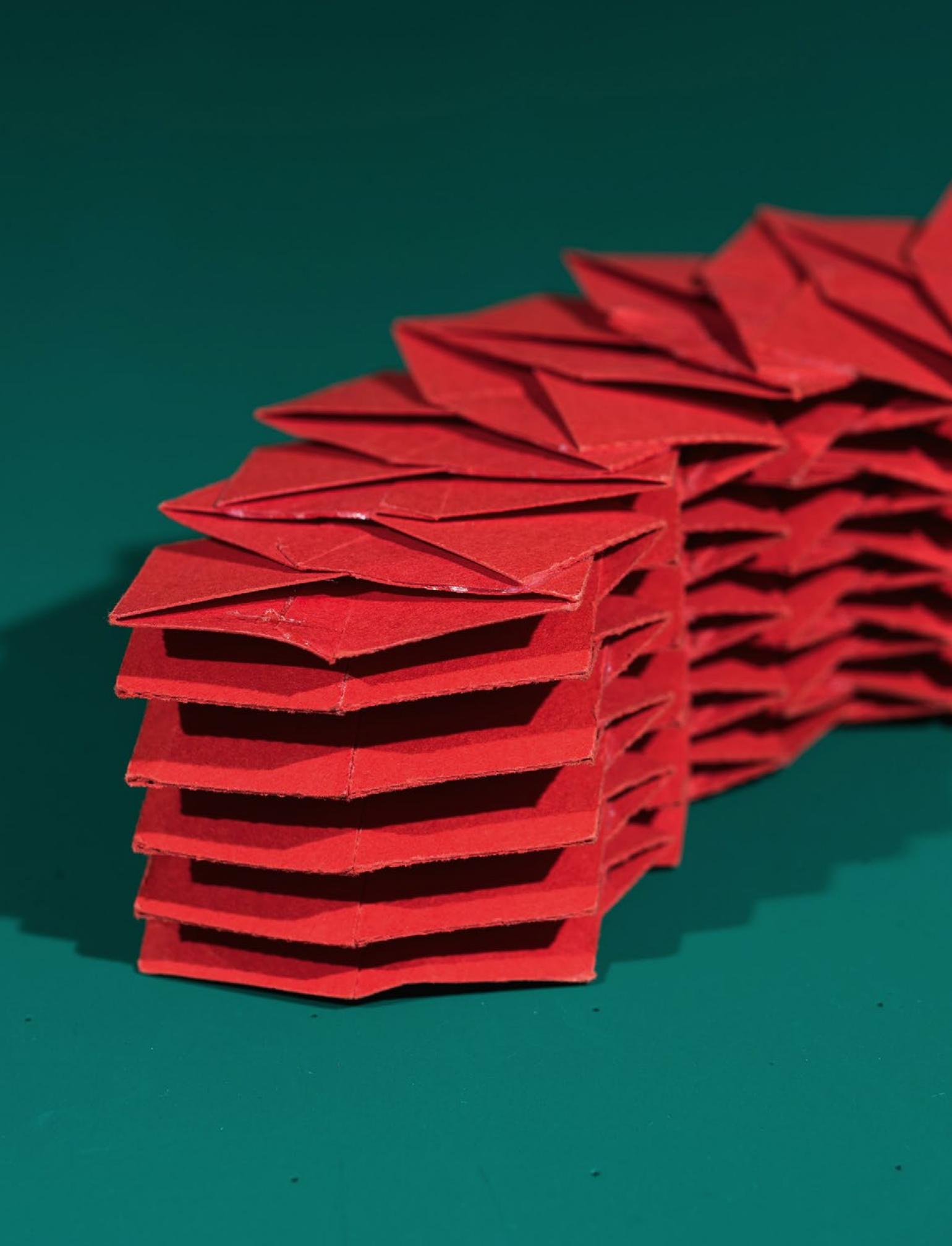


plieguen por completo hasta después de la translocación. Por supuesto, la primera estrategia tenía probabilidades preocupantemente altas de dañar el funcionamiento de la proteína (incluso con mutaciones puntuales que se sabía que no eran patógenas si se empleaban de forma aislada), y la segunda dependía de biotecnologías nuevas y en su mayor parte sin testar.

En 2006, un grupo francés que trabajaba con mitocondriopatías hereditarias demostró que, introduciendo una secuencia de acceso en la región 3' no transcrita del ARN mensajero para la ATP6 (una subunidad del complejo ATP sintasa y una de las trece proteínas codificantes del ADNmt), era posible restringir el ARN mensajero a la superficie mitocondrial. La restricción conseguida, de hecho, es tan intensa, que la importación se vuelve «co-traslacional»: la cadena de aminoácidos se nutre mediante la maquinaria importada al ser sintetizada, antes de plegarse, obviando así el problema de su hidrofobia. Más adelante, el mecanismo demostró ser efectivo para los genes ND1 y ND4. Con la aprobación de los creadores de la técnica (que están trabajando en la aplicación clínica de sus resultados originales), personal del SENS Research Center trabaja para confirmar si es posible aplicar la misma metodología a las diez proteínas codificantes del ADNmt restantes.

CONCLUSIÓN

SENS supone un alejamiento muy radical de las prioridades anteriores de la gerontología biomédica y busca revertir de verdad el envejecimiento en lugar de simplemente aplazarlo. Gracias a un minucioso proceso de educación mutua entre los campos de la biogerontología y la medicina regenerativa, ahora ha alcanzado el estatus de opción viable y reconocida para un futuro control médico del envejecimiento. Mi opinión es que su credibilidad seguirá aumentando a medida que progrese la tecnología de medicina regenerativa subyacente.



La robótica, los materiales inteligentes y su impacto futuro para la humanidad

JONATHAN ROSSITER

Imagen de apertura:
El origami podría dar una vuelta de tuerca a la ingeniería estructural, con aplicaciones que van desde el transporte y la construcción hasta el espacio exterior. Esta estructura de origami está compuesta de 12 tubos interconectados que, una vez plegados, pueden transportarse con facilidad



Jonathan Rossiter

University of Bristol, Bristol, Reino Unido
Engineering and Physical Sciences Research Council (EPSRC),
Swindon, Reino Unido

Es profesor de Robótica en la University of Bristol e investigador del EPSRC. Fundador y director de Soft Robotics Group, en el Bristol Robotics Laboratory, ha sido investigador titular de la Royal Society y de la JSPS. Ha recibido más de 17 millones de libras para investigación y es autor de más de 130 artículos revisados por pares, patentes y licencias comerciales. Sus áreas de interés se centran en la robótica del futuro y en especial en los campos emergentes de robótica blanda y materiales inteligentes. Ha desarrollado nuevas tecnologías, incluidos robots biodegradables, tacto natural con capacidad afectiva, pieles inteligentes para camuflaje, compuestos con memoria de forma y actuadores blandos con múltiples grados de libertad. Con el desarrollo de tecnologías como estas, Jonathan Rossiter trabaja por la consecución de una robótica verdaderamente ubicua.

¿Qué es un robot? ¿Qué es un material inteligente? ¿Cómo pueden tener un impacto tan importante en nuestras vidas futuras? En el presente artículo analizaremos el verdadero potencial de la robótica y, en particular, de la robótica blanda-inteligente. Estas tecnologías van a dar un vuelco total a nuestra percepción de qué es un robot y cómo nos puede ayudar en el mundo en el que vivimos. En lugar de ver los robots como grandes máquinas rígidas y robustas, podemos pensar en los robots del futuro como organismos artificiales robóticos que cuentan con propiedades que imitan y amplían en gran medida las capacidades de los organismos naturales. Las propiedades únicas de blandura y elasticidad de estas máquinas las hacen muy adecuadas para interacciones con elementos muy delicados, como el cuerpo humano. Además, abordaremos cuestiones sobre la robótica emergente que todavía no han sido objeto de reflexión, como la biodegradabilidad y la transducción de energía regenerativa. Estas nuevas tecnologías impulsarán el avance de la robótica, pero ignoramos hacia dónde, igual que se desconoce la forma exacta de los robots del futuro. Sin embargo, sí que podemos vislumbrar el impacto futuro de la robótica en el ser humano.

INTRODUCCIÓN

El siglo XIX estuvo marcado por la aceleración y la generalización de los procesos industriales. Al principio del siglo, la Revolución Industrial estaba a mitad de su desarrollo, mientras que en sus postrimerías habíamos desarrollado el coche y estábamos a punto de probar el vuelo con motor. El impacto en la vidas de los humanos fue enorme; se reescribieron las normas sociales y económicas que gobernaban el transporte, la sanidad, la manufactura, los entornos de trabajo y la vida doméstica. En el siglo XX, este proceso se repitió con la Revolución Tecnológica, pero a un ritmo mucho más veloz. La tecnología se desplazó del laboratorio y el instituto de investigación al hogar. El papel de motor impulsor recaía en los nuevos reinos de la electrónica, las telecomunicaciones, la automatización y la computación, en lugar de los sistemas mecánicos del siglo anterior. En los primeros años del siglo XX casi no había teléfonos, pero en los albores del nuevo milenio los móviles eran moneda común; cien años antes apenas se había oído hablar de computadoras, que ya han adquirido una presencia universal. Hoy estamos a las puertas de un nuevo cambio tecnológico de la misma relevancia:



la Revolución Robótica. Esta revolución convertirá el siglo XXI en un momento crucial en la historia. Es más, tendrá un impacto irrevocable en nuestras vidas y en las vidas futuras.

En todo caso, ¿qué es la Revolución Robótica y qué comportará en realidad? Para responder a esta pregunta debemos analizar qué es un robot, qué nuevas tecnologías están surgiendo y cambiarán su definición y cómo influirán en la vida de las personas y en la salud del planeta. Si revisamos brevemente las dos revoluciones anteriores, la industrial y la tecnológica, observamos que se caracterizaron por el desarrollo de dos conceptos muy dispares: el mecánico y el eléctrico. La Revolución Robótica, por su parte, explota una fusión entre los sistemas mecánicos, los sistemas eléctricos y los nuevos métodos de computación e inteligencia. Mediante la combinación de lo mejor de las múltiples tecnologías existentes y las nuevas se está desarrollando y se desarrollará un abanico bastante asombroso de robots y sistemas robóticos.

ROBOTS: DE AMENAZA EN LA GUERRA FRÍA A FUTUROS SALVADORES

A menudo se define un «robot» por sus capacidades: es una máquina que puede efectuar series complejas de acciones y, en especial, que se puede programar por ordenador. Se trata de una definición útil que engloba una gran proporción de los robots convencionales del tipo que podemos ver en las películas de ciencia ficción. Esta definición y el peso de las percepciones culturales consolidadas sobre qué es un robot influyen en nuestra visión de qué podría ser un robot. El mejor modo de entenderlo es analizar las actitudes culturales frente a los robots en todo el mundo. Si escribimos «robot» en la versión en lengua inglesa del buscador Google, obtenemos imágenes que casi exclusivamente son humanoides, brillantes, de estructura rígida y exentos de emoción (véase Figura 1a). Hay también algunos robots de tipo militar, de aspecto más bien oscuro y agresivo. Estos resultados están sesgados significativamente por el corpus cultural que Google utiliza para encontrar estas opiniones. Si efectuamos la misma búsqueda en la web de Google en lengua japonesa (introduciendo ロボット, el término japonés para robot), obtenemos un conjunto de resultados distintos, como se muestra en la Figura 1b. En este caso, los resultados presentan unos robots mucho más amigables y accesibles, con menos rasgos humanoides y apariencias que recuerdan a dibujos animados o animales. La causa de tal diferencia es histórica y procede del marco cultural de posguerra en el cual se inscribían las nuevas tecnologías y, en particular, la robótica, durante la Guerra Fría. Los robots se convirtieron en un ejemplo de amenaza alienígena. Por el contrario, Japón no se vio afectado por estos prejuicios y, por consiguiente, los robots se consideraban entidades benignas. Estas diferencias históricas y culturales en el desarrollo de la robótica tienen consecuencias profundas: la robótica occidental está fuertemente entrelazada con la investigación militar, mientras que la robótica oriental se centra en la asistencia, el cuidado sanitario y la industria. Estos antecedentes culturales perpetúan también nuestras visiones sesgadas sobre qué aspecto debería tener un robot y cómo se tendría que comportar.

Ahora tenemos la oportunidad de romper con estas convenciones. No es necesario que un robot sea humanoide, que tenga miembros, que camine ni que hable. En lugar de ello, cabe una interpretación mucho más amplia de qué es un robot. Los límites entre los materiales inteligentes, la inteligencia artificial, la personificación, la biología y la robótica se están



volviendo difusos: he aquí la verdadera vía por la cual la robótica influiría en la raza humana en los próximos veinte a cuarenta años. ¡Y menudo impacto cabe esperar! Desde robots que puedan supervisar y reparar el entorno natural hasta nanorrobots para controlar y eliminar el cáncer; desde robots que liderarán la colonización de planetas hasta robots de compañía que nos salvarán de la soledad en la edad avanzada. Ni en nuestra sociedad ni en nuestras vidas habrá nada ajeno a la influencia de la robótica del futuro. En resumen, serán ubicuos.

BÚSQUEDA DE LA PALABRA «ROBOT» EN GOOGLE.COM (a) Y EL TÉRMINO EQUIVALENTE «ロボット» EN GOOGLE.CO.JP (b)



FIGURA 1

Búsquedas realizadas el 10 de agosto de 2016.

HACIA UNOS ORGANISMOS ROBÓTICOS UBICUOS

La naturaleza ha encontrado vías de explotar las diferencias en las condiciones medioambientales y amoldarse a ellas. A través de la adaptación evolutiva, se han desarrollado un sinnúmero de organismos que operan y progresan en condiciones diversas y a menudo extremas. Por ejemplo, el tardígrado (Schokraie *et al.* 2012) es capaz de sobrevivir a presiones superiores a las existentes en los océanos más profundos y en el espacio, puede soportar temperaturas desde 1 K (-272 °C) a 420 K (150 °C) y puede vivir treinta años sin alimentos. Asimismo, los organismos a menudo operan en simbiosis con otros. Por ejemplo, el humano medio tiene cerca de 30 billones de células, pero contiene cerca de 40 billones de





bacterias (Sender *et al.* 2016). Los organismos naturales abarcan tamaños que van del de las bacterias independientes más pequeñas, las *Pelagibacter ubique*, de cerca de 0,5 μm de longitud, al de la ballena azul, de alrededor de 30 metros de largo. ¡Un rango de longitudes de siete órdenes de magnitud, por aproximadamente 15 órdenes de magnitud en volumen! Lo que muestran estos datos asombrosos es que, si la naturaleza puede usar los mismos componentes biológicos (ADN, aminoácidos, etcétera) para un abanico tan asombroso de organismos, nosotros también podemos emplear nuestros componentes robóticos para cubrir un espectro mucho mayor de entornos y aplicaciones que los actuales. De este modo, podríamos igualar la ubicuidad de los organismos naturales.

Para conseguir la ubicuidad robótica no solo debemos estudiar y reproducir los hitos de la naturaleza, también ir más allá con un desarrollo más veloz (¡sin duda, menos dilatado en el tiempo que la propia evolución!) y más tecnologías generales y adaptables. Otro modo de ver los robots futuros es considerarlos *organismos artificiales*. En lugar de un robot convencional que se puede descomponer entre los apartados mecánico, eléctrico e informático, podemos pensar en un robot en términos de sus homólogos biológicos, y con tres componentes principales: un cuerpo, un cerebro y un estómago. En los organismos biológicos, la energía es convertida en el estómago y se distribuye por todo el cuerpo para alimentar los músculos y el cerebro, que controla el organismo. Por lo tanto, se da una equivalencia funcional entre el organismo robótico y el organismo natural: el cerebro equivale a la computadora o sistema de control, el cuerpo a la estructura mecánica del robot, y el estómago a la fuente de energía del robot, ya se trate de una batería, una placa solar o cualquier otra fuente de energía. La ventaja del paradigma del organismo artificial es que nos alienta a explotar todas las características de los organismos biológicos e, incluso, ir más allá. Estas características comprenden cualidades en gran medida omitidas por la investigación robótica actual, como el funcionamiento en condiciones variables y duras, la integración en entornos medioambientales benignos, la reproducción, la muerte y la descomposición. Todas ellas son esenciales para el desarrollo de unos organismos robóticos ubicuos.

Este objetivo solo es factible mediante una investigación concertada en las áreas de los materiales inteligentes, la biología sintética, la inteligencia artificial y la adaptación. En este capítulo nos centraremos en el desarrollo de materiales inteligentes novedosos destinados a la robótica, pero también entenderemos por qué el desarrollo de materiales no puede aislarse de otras áreas de investigación muy necesarias.

MATERIALES INTELIGENTES PARA ROBOTS BLANDOS

Un material inteligente es aquel que muestra un efecto observable en una de sus facetas cuando es estimulado desde otra. Quedan cubiertas todas las facetas, incluida la mecánica, la eléctrica, la química, la óptica, la térmica, etcétera. Por ejemplo, un material termocromático muestra un cambio de color cuando se calienta, mientras que un polímero electroactivo genera una prestación mecánica (es decir, se mueve) cuando recibe una estimulación eléctrica (Bar-Cohen 2004). Los materiales inteligentes pueden añadir nuevas capacidades a la robótica y, especialmente, a los organismos artificiales. ¿Necesitamos un robot que pueda detectar los productos químicos? Podemos utilizar un material inteligente que cambie de propiedades eléctricas cuando esté expuesto al producto químico en cuestión. ¿Necesitamos un dispositivo robótico que se pueda implantar en una persona pero que se degrade hasta desaparecer cuando haya cumplido su función? Podemos emplear polímeros biodegradables, biocompatibles y de disolución selectiva. La «inteligencia» de los materiales inteligentes se puede incluso cuantificar. Su coeficiente de inteligencia (CI) se puede calcular evaluando su capacidad de respuesta, agilidad y complejidad (por ejemplo, el número de cambios de fase que pueden soportar) (Cao *et al.* 1999). Si combinamos múltiples materiales inteligentes en un robot podemos incrementar en gran medida el CI de su cuerpo.

Los materiales inteligentes pueden ser duros, como los piezomateriales (Curie y Curie 1881); flexibles, como las aleaciones con memoria de forma (Wu y Wayman 1987); blandos, como los elastómeros dieléctricos (Pelrine *et al.* 2000); e incluso fluidos, como los ferrofluidos (Albrecht *et al.* 1997) y los fluidos electrorreológicos (Winslow 1949). Es una muestra de la gran facilidad y variedad de estos materiales, que cubren en gran medida el mismo conjunto de propiedades físicas (rigidez, elasticidad y viscosidad) que el tejido biológico. Una característica importante de casi todos los organismos biológicos y, sin duda, de todos los animales, es que dependen de la blandura. Ningún animal, ya sea grande o pequeño, insecto o mamífero, reptil o pez, es totalmente duro. Incluso los insectos, dotados de exoesqueletos rígidos, son blandos y adaptables por dentro. Es un fenómeno directamente relacionado con la dependencia de la naturaleza de la actuación (la generación de movimiento y fuerzas) de tejido blando como el muscular. La humilde cucaracha es un excelente ejemplo de ello: aunque cuente con un cuerpo muy rígido y robusto, sus miembros están articulados mediante tejido muscular blando





De izquierda a derecha: el protozoo *Euglena flagellate*, el robusto tardigrado *Milnesium tardigradum* y el pulpo mimético *Thaumoctopus mimicus*

(Jahromi y Atwood 1969). Si observamos con detenimiento el reino animal, podemos encontrar muchos organismos que son blandos casi por completo. Por ejemplo, los gusanos, las babosas, los moluscos, los cefalópodos y algunas algas pequeñas como la euglena. Sacan partido a su blandura para doblarse, retorcerse y estrujarse a fin de cambiar de forma, esconderse y desplazarse. Sin ir más lejos, un pulpo, para escapar, puede encogerse hasta pasar por una abertura de menos de una décima parte del diámetro de su cuerpo (Mather 2006). A pesar de su blandura, puede también generar fuerzas suficientes para aplastar objetos y otros organismos, al tiempo que goza de la destreza suficiente para abrir la tapa a rosca de un frasco (BBC 2003). Estas deformaciones corporales tan notables son posibles no solo gracias a los tejidos musculares blandos, también a la explotación de principios hidráulicos e hidrostáticos que permiten un cambio controlable de la rigidez (Kier y Smith 1985).

En la naturaleza abundan los ejemplos de qué se puede hacer con los materiales blandos, de modo que nos interesa explotar dichas posibilidades en nuestros robots. Pasemos ahora a abordar algunas de las tecnologías con el potencial para brindarnos esta capacidad. Las tecnologías robóticas de vanguardia se pueden dividir en tres grupos: 1) sistemas blandos hidráulicos y neumáticos, 2) materiales inteligentes como sensores y actuadores y 3) materiales que cambian de rigidez. En fechas recientes, la robótica blanda ha cobrado protagonismo gracias al resurgir de los sistemas de impulso por fluido combinado con una mayor comprensión de la modelización de materiales elastoméricos. Aunque se ha hecho un gran trabajo en el perfeccionamiento de los actuadores neumáticos de goma con refuerzo trenzado (Meller *et al.* 2014), este discreto enfoque basado en componentes limita su ámbito de aplicación.

Se evidencia un mejor enfoque en la clase *pneunet* (red neumática) de actuadores robóticos (Ilievski *et al.* 2011) y su evolución hacia los dispositivos blandos ponibles (Polygerinos *et al.* 2015) y los robots robustos (Tolley *et al.* 2014). Las *pneunets* son estructuras neumáticas multicámara y de una sola pieza, formadas por elastómeros de poliuretano y silicona. Por desgracia, los sistemas hidráulicos y neumáticos están enormemente limitados por su necesidad de bombas externas, depósitos de aire o fluido y válvulas. Estos mecanismos añaden un volumen y un peso considerable al robot y reducen su blandura.



Un enfoque mucho mejor consiste en buscar sistemas que no dependan de estos aparatosos elementos auxiliares. Los sensores y actuadores de materiales inteligentes tienen el potencial de permitirlo mediante la sustitución de la presión del fluido por efectos eléctricos, térmicos o fotónicos. Por ejemplo, los polímeros electroactivos (PEA) convierten la energía eléctrica en deformación mecánica. Las Figuras 2 y 3 muestran dos formas comunes de PEA: el actuador de elastómero dieléctrico (AED) (Pelrine *et al.* 2000) y el actuador de polímero iónico (API) (Shahinpoor y Kim 2001). El AED está compuesto de una capa central de elastómero de alta constante dieléctrica, encerrada entre dos capas elásticas de electrodo. Cuando un campo eléctrico de gran magnitud (del orden de 1 MV/m) se aplica a la estructura compuesta, se acumulan cargas opuestas en los dos electrodos y estas se ven atraídas por las fuerzas de Coulomb, etiquetadas con σ en la Figura 2. Estas inducen tensiones de Maxwell en el elastómero, que hacen que se comprima entre los electrodos y se expanda en el plano, etiquetado con ϵ en la Figura 2. Dado que las fuerzas de Coulomb son inversamente proporcionales a la separación entre cargas y que los electrodos se expanden al actuar, lo que incrementa el área de acumulación de carga, la tensión inducida en el actuador AED es proporcional al cuadrado del campo eléctrico. Esto incentiva a reducir al máximo el grosor de la capa de elastómero. Desgraciadamente, una capa más fina de elastómero hace necesarias más capas para hacer nuestro robot, con la consiguiente mayor probabilidad de un defecto de fabricación o una avería eléctrica. Dado que los AED tienen una densidad de potencia cercana a la de los músculos biológicos (Pelrine *et al.* 2000), son buenos candidatos para su desarrollo hacia organismos artificiales y dispositivos de asistencia ponibles.

FIG. 2. ESTADOS (a) NO ACTUADO Y (b) ACTUADO DE UN ACTUADOR BLANDO DE ELASTÓMERO DIELÉCTRICO

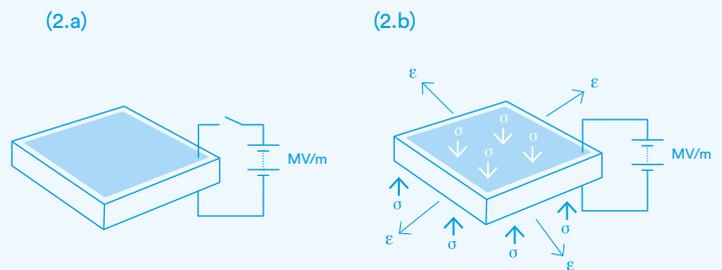
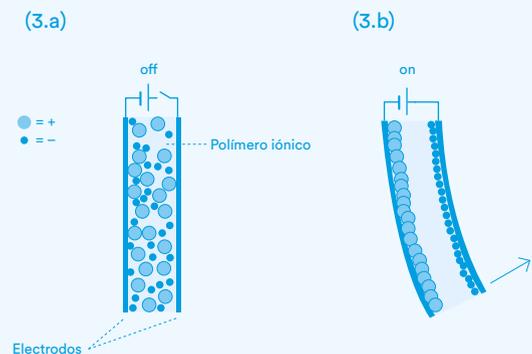


FIG. 3. ESTADOS (a) NO ACTUADO Y (b) ACTUADO DE UN ACTUADOR DE POLÍMERO IÓNICO



FIGURAS 2 Y 3



Por otra parte, los actuadores de polímero iónico son materiales inteligentes que funcionan de acuerdo con un principio electromecánico distinto, como muestra la Figura 3. Los API se fabrican a partir de una capa central conductora iónica, de nuevo encerrada entre dos electrodos conductores. Sin embargo, a diferencia de los AED, su campo eléctrico es mucho menor (1 kV/m) y, por lo tanto, los electrodos deben tener más capacidad de conducción. Cuando se aplica un campo eléctrico, los iones libres del conductor iónico se desplazan hacia los electrodos, donde se acumulan. La elevada concentración de iones en los electrodos hace que se expandan, dado que las cargas iguales se repelen a causa de las fuerzas de Coulomb de la zona. Si los cationes (+) y los iones (-) guardan diferencias significativas en tamaño y carga, habrá una falta de correspondencia en la expansión de los dos electrodos y el API se doblará. La ventaja del API es que funciona con voltajes mucho menores que los AED, pero solamente puede generar fuerzas menores. Un recién llegado al catálogo de materiales inteligentes es el actuador de nailon bobinado (Haines *et al.* 2014). Se trata de un actuador térmico fabricado a partir de un único filamento de nailon insertado en torsión y enrollado. Al calentarse, su estructura se contrae. Pese a que el actuador de nailon tiene el potencial de proporcionar dispositivos robóticos fiables y de bajo coste, está condenado por su ciclo térmico. Al igual que con el resto de actuadores térmicos, incluidas las aleaciones con memoria de forma (AMF), es relativamente fácil calentar la estructura (y, de este modo, hacer que se contraiga su filamento parecido a un músculo), pero es mucho más complicado volver atrás y enfriar el dispositivo. En consecuencia, la velocidad de ciclo de los actuadores de nailon (y de los de AMF) es baja, de menos de 10 Hz. Por el contrario, los AED y API se han probado a cientos de hercios y se ha mostrado que los AED podían incluso funcionar como un altavoz (Keplinger *et al.* 2013).

La última capacidad necesaria para fabricar el cuerpo de los organismos robóticos blandos es el cambio de rigidez. Pese a que se puede conseguir mediante la activación de músculos, como en los pulpos, existen varias tecnologías de robótica blanda susceptibles de lograr la modulación de la rigidez con independencia de la actuación. En este grupo de tecnologías encontramos los polímeros con memoria de forma (PMF) y la consolidación granular (*jamming*). Los PMF son polímeros que experimentan una transición de fase controlable y reversible desde un estado rígido y vídrioso a una forma blanda y elástica (Lendlein *et al.* 2013). Lo más común es que sean estimulados mediante calor, pero algunos PMF efectúan su transición al recibir estímulos fotónicos o eléctricos. Una propiedad destacable de los PMF es su capacidad de «memorizar» un estado programado. De este modo se puede conseguir que un robot PMF haga una transición de blando a duro y, una vez completada la operación, lograr a su vez que regrese automáticamente a su forma previa a la programación. Los PMF nos brindan también la interesante posibilidad de combinarlos con actuadores estimulados por la misma fuente de energía. Por ejemplo, un polímero con memoria de forma de accionamiento térmico se puede combinar con un PMF térmico para proporcionar una estructura compleja que comprenda la actuación, el cambio de rigidez y la memoria en una sola unidad alimentada en exclusiva por calor (Rossiter *et al.* 2014). La consolidación granular o *jamming*, al contrario que el cambio de fase de los PMF, es un mecanismo más mecánico (Amend *et al.* 2012). Se rellena con materiales granulares una cámara flexible, cuya rigidez se puede controlar bombeando un fluido a su interior o extrayéndolo. Cuando el aire se evacúa de la cámara, la presión atmosférica debida al vacío del interior de la cámara hace que los gránulos se compriman entre sí y se tornen rígidos. De este modo, se puede fabricar una



estructura cambiante de rigidez binaria blanda-dura. Una estructura compuesta de este tipo resulta muy adecuada para dispositivos de ayuda ponibles y robots de exploración.

ROBOTS DONDE MENOS LOS ESPERAMOS

Después de haber abordado las tecnologías que abrirán la puerta a una nueva generación de robótica, pasamos a analizar el modo en que dichos robots pueden aparecer en nuestra vida y cómo nos relacionaremos y viviremos con ellos.

Pieles inteligentes

La flexibilidad de la robótica blanda la hace ideal para la interacción directa con el tejido biológico. Las interacciones blando-blando entre un robot de este tipo y un ser humano son, por naturaleza, mucho más seguras que la interfaz rígido-blando que imponen los robots rígidos convencionales. Se ha trabajado mucho en los materiales inteligentes para el contacto directo de piel contra piel y para la integración en la piel humana, lo que incluye conexiones eléctricas y componentes electrónicos (Kim *et al.* 2011). Una segunda piel robótica blanda de tipo funcional puede ofrecer muchas ventajas inasequibles para un revestimiento convencional. Por ejemplo, puede mimetizar la capacidad de cambiar de color de los cefalópodos (Morin *et al.* 2012) o cambiar fluidos de lugar, como los peces teleósteos (Rossiter *et al.* 2012), y de ese modo regular la temperatura. El devenir natural de este tipo de pieles radica en la fabricación de vendas inteligentes para facilitar la curación de heridas y reducir la difusión de las bacterias con resistencia microbiana, al limitar la necesidad de antibióticos. Por supuesto, estas pieles pueden servir de ropa, pero todavía nos queda lejos la aceptación social de segundas pieles como sustitutas de las prendas de vestir convencionales. Por otra parte, si explotamos las tecnologías de actuación blanda fibrosa como el actuador de bobina de nailon y los compuestos de aleación-polímero con memoria de forma (Rossiter *et al.* 2014), podremos tejer músculos artificiales en el interior de las telas. Por consiguiente, nos brindan la posibilidad de crear ropa activa y reactiva. Estas prendas inteligentes ofrecen también una nueva facultad sin igual: dado que el material inteligente está en contacto directo con la piel y que cuenta con capacidades de actuación, puede aplicar a la piel una estimulación mecánica directa. De este modo, podemos integrar la comunicación táctil en la ropa. Hay que tener en cuenta que el canal de la comunicación táctil se ha quedado rezagado respecto a los demás sentidos. Tomemos, como ejemplo, los *smartphones* actuales: su elevado ancho de banda tanto para la reproducción de imágenes como de sonido contrasta con unas capacidades de estimulación táctil casi inexistentes. Con prendas de vestir con función táctil podríamos generar sensaciones «afectivas» naturales de tacto, lo que nos ofrecería un nuevo y revolucionario canal de comunicación potencial. En lugar de un rudo motor vibrador (como el empleado en los teléfonos móviles) podríamos acariciar, hacer cosquillas o proporcionar otras sensaciones táctiles agradables (Knoop y Rossiter 2015).

Dispositivos de asistencia

Si la ropa inteligente anteriormente citada fuera capaz de generar fuerzas superiores, podría servir no solo para la comunicación, sino también para la asistencia física. Una solución futura para las personas debilitadas, discapacitadas o ancianas pueden ser las prendas de vestir con



asistencia de movimiento, que les devolverán la movilidad. Devolver la movilidad puede tener un impacto considerable en la calidad de vida del que lleva la ropa e incluso permitirle volver a la vida productiva, con lo que se contribuiría a su vez a la economía en general. La dificultad de esta propuesta es la densidad de potencia de las tecnologías de actuación que contienen los dispositivos de asistencia. Si el que se pone esa prenda sufre de debilidad, por ejemplo al haber perdido masa muscular, necesitará un aumento de potencia significativo, pero el peso necesario para lograrlo podría resultar contraproducente. Por lo tanto, un dispositivo de asistencia debería ser lo más ligero y confortable posible, con una actuación dotada de una densidad de potencia significativamente superior a la de los músculos biológicos. En la actualidad es algo que todavía no está al alcance de la tecnología más avanzada. Llegado un momento, los dispositivos de asistencia ponibles harán innecesarios los dispositivos de asistencia convencionales. ¿Por qué usar una silla de ruedas si se puede volver a caminar con unos pantalones impulsores basados en robótica blanda?

Dispositivos médicos

La biointegración que ejemplificaban los dispositivos ponibles descritos en el apartado anterior se puede llevar más allá, *dentro del* cuerpo. Dado que la robótica blanda es tan adecuada para la interacción con tejido biológico, no es descabellado imaginar que un dispositivo de este tipo se pueda implantar en el cuerpo e interactuar físicamente con sus estructuras internas. Por consiguiente, podríamos fabricar dispositivos médicos implantables capaces de restaurar la funcionalidad de órganos y estructuras enfermos o dañados.

Pensemos, por ejemplo, en el tejido blando canceroso que puede afectar a nuestros órganos, desde los intestinos y la próstata hasta la laringe y la tráquea. Ante estas enfermedades, el tratamiento típico implica la escisión quirúrgica del cáncer y la gestión de las afecciones resultantes. Es posible que un paciente con cáncer de laringe se someta a una laringectomía que después le prive de la capacidad de hablar y le obligue a sufrir una traqueotomía permanente. Mediante el desarrollo y la implantación de un órgano robótico blando de sustitución podemos restaurar sus capacidades funcionales y permitir que el paciente vuelva a hablar, tragar, toser y disfrutar de la vida. Esta robótica blanda biointegrada se encuentra en fase de desarrollo y se espera que llegue al ámbito clínico en los próximos diez a quince años.

Robots biodegradables y ecológicos

Es natural ampliar el concepto de biointegración desde el entorno doméstico (antropocéntrico) hasta el entorno natural. Hoy en día, los robots que operan en el entorno natural se ven limitados por las tecnologías mismas en que se basan. Dado que están hechos de materiales rígidos, complejos y dañinos para el medio ambiente, deben ser sometidos a un control constante. Cuando alcanzan el final de sus vidas productivas, hay que recuperarlos y procesarlos como residuos. En cambio, si pudiéramos fabricar robots totalmente respetuosos con el medioambiente, podríamos despreocuparnos más de su recuperación una vez que ya no sirvieran. Esto es ya posible gracias al desarrollo de la robótica blanda biodegradable (Rossiter *et al.* 2016). Sacando partido a materiales inteligentes que no solo son seguros para el medioambiente durante su vida útil, sino que también se degradan de un modo seguro hasta su total descomposición en la naturaleza, podemos crear robots que vivan, mueran y desaparezcan sin daños medioambientales. Cambia así nuestro modo de desplegar robots

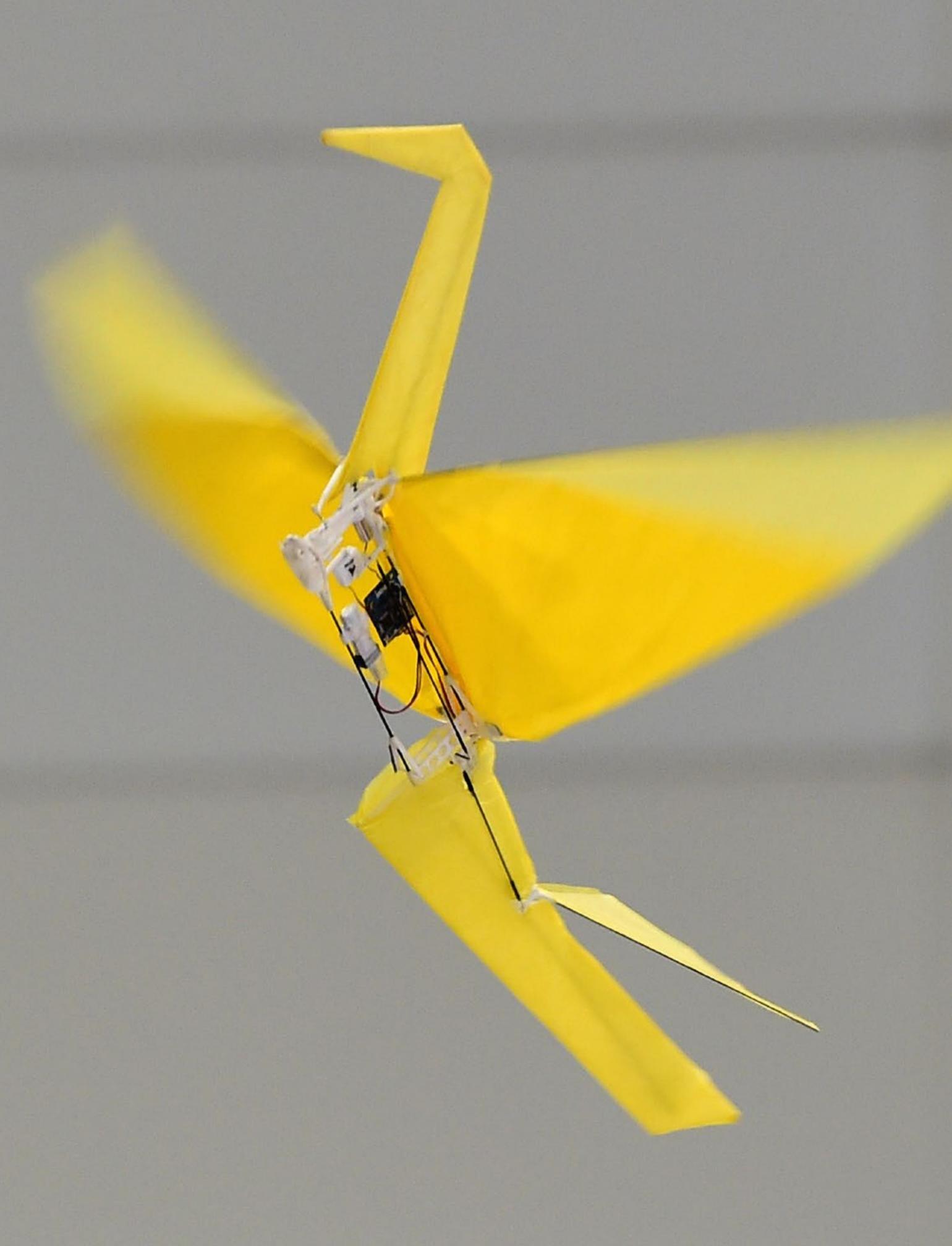


«¿Por qué no podemos escribir los veinticuatro volúmenes de la *Enciclopedia Británica* en la cabeza de un alfiler?»

RICHARD FEYNMAN (1918-1988)

Físico teórico estadounidense, durante el célebre discurso «There's plenty of room at the bottom» (Hay mucho espacio al fondo), pronunciado en 1959 en el encuentro anual de la American Physical Society

Demostración de una grulla de papel origami, de solo 32 gramos de peso, en la Feria Internacional de Robótica de Tokio, en 2015





en el entorno natural: en lugar de tener que vigilar y recuperar un número reducido de robots dañinos para el medioambiente, podemos desplegar miles o incluso millones de robots con la tranquilidad de saber que se degradarán sin peligro en la naturaleza, sin causar daño alguno. Una evolución natural de los robots biodegradables consiste en los robots comestibles. En este caso, un robot comestible se podría ingerir, trabajar durante un día dentro del cuerpo y, a continuación, ser procesado por el organismo. Nos brindaría, pues, un nuevo método para administrar tratamientos y medicamentos en el interior del cuerpo de un modo controlado y cómodo.

Robots blandos inteligentes

Todos los actuadores blandos descritos en apartados anteriores ejercen de transductores. Es decir, convierten una forma de energía en otra. A menudo este efecto de transducción se puede invertir. Por ejemplo, los actuadores de elastómeros dieléctricos se pueden reconfigurar para convertirse en generadores de elastómeros dieléctricos (Jin *et al.* 2011). En un generador de este tipo la membrana de elastómero blando es deformada mecánicamente, lo que genera electricidad. Ahora podemos combinar este efecto generador con la robótica ponible que hemos descrito en apartados anteriores. Un dispositivo ponible actuador-generador puede, por ejemplo, proporcionar más potencia al subir una cuesta y, una vez que el usuario haya alcanzado la cima, generar electricidad a partir del movimiento del cuerpo, mientras el usuario camina tranquilamente cuesta abajo. Este tipo de «frenada regenerativa» de los robots blandos es solo un ejemplo del potencial de la conversión bidireccional de energía en este tipo de robótica. Estos materiales muestran dos componentes de computación: de entrada y de salida. Al combinar estas dos capacidades con las propiedades de respuesta a la tensión inherentes a los citados materiales, cabe la posibilidad de realizar robots que puedan computar con sus cuerpos. Se trata de un paradigma nuevo y potente, a menudo descrito en términos más generales como inteligencia incorporada o computación morfológica (Pfeifer y Gómez 2009). Por ejemplo, mediante la computación morfológica podemos otorgar un control de bajo nivel al cuerpo del robot blando. Por lo tanto, ¿necesitamos que nuestro organismo robótico blando tenga cerebro? En muchos robots blandos sencillos el cerebro puede estar de más, puesto que su cuerpo mismo lleva a cabo toda la computación efectiva. Este rasgo simplifica todavía más a este tipo de robot y contribuye a su potencial de ubicuidad.

CONCLUSIONES

El presente capítulo apenas ha analizado la punta del iceberg de qué es un robot, cómo se puede pensar en este como en un organismo robótico blando y de qué modo los materiales inteligentes ayudarán a hacer realidad y revolucionar la robótica del futuro. Por otra parte, se ha analizado el impacto futuro de la robótica en los humanos, pero lo cierto es que solo podemos aventurar su magnitud. Del mismo modo que el impacto de internet y de la *World Wide Web* eran imposibles de predecir, no podemos imaginar adónde nos llevará la robótica futura. ¿Realidad virtual inmersiva? Sin duda. ¿Cuerpos de recambio? Es probable. ¿Un trastorno total de nuestras vidas y de la sociedad? ¡Bastante posible! En nuestro discurrir por el camino de la revolución robótica, cuando echemos la vista atrás recordaremos esta década como el escenario del verdadero despegue de la robótica, cuando se sentaron las bases de nuestro mundo futuro.



BIBLIOGRAFÍA

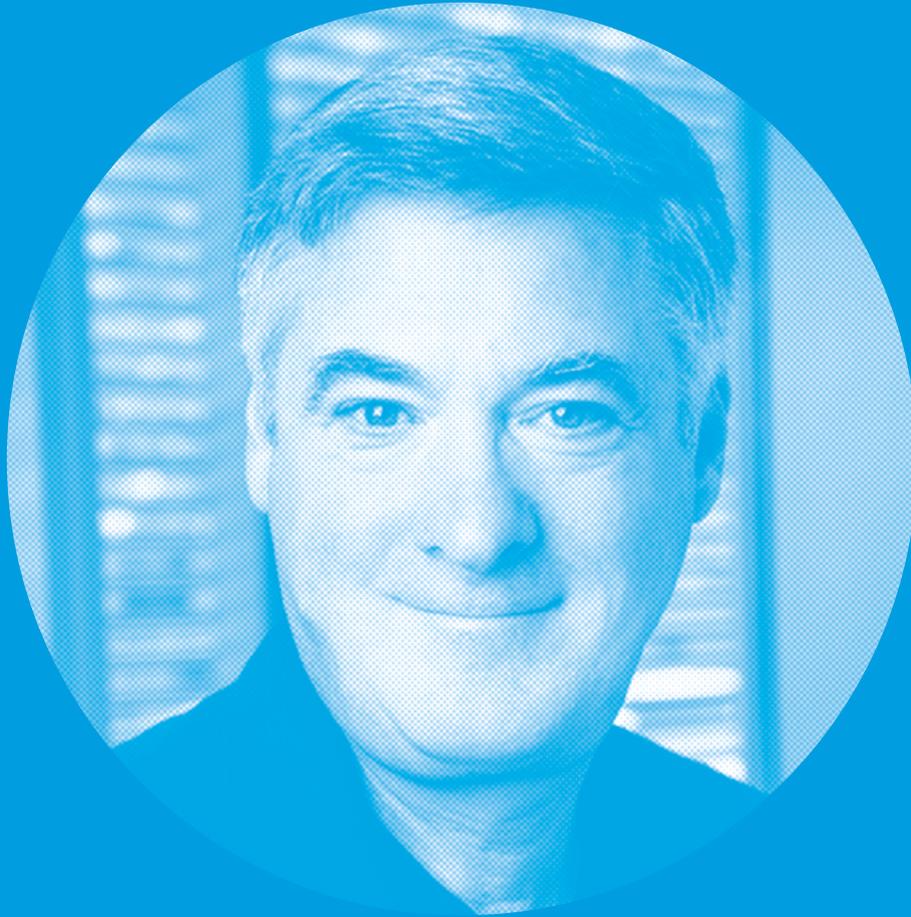
- Albrecht, T., Bühner, C., Fähnle, M., Maier, K., Platzek, D. y Reske, J., «First Observation of Ferromagnetism and Ferromagnetic Domains in a Liquid Metal», en *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, vol. 65, n.º 2, 1997, p. 215.
- Amend, J. R., Brown, E., Rodenberg, N., Jaeger, H. M. y Lipson, H., «A Positive Pressure Universal Gripper Based on the Jamming of Granular Material», en *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 28, n.º 2, 2012, pp. 341-350.
- Bar-Cohen, Y. (ed.), «Electroactive Polymer (EAP) Actuators as Artificial Muscles - Reality, Potential, and Challenges», 2.ª ed., Bellingham, Washington, SPIE Press, 2004.
- BBC News, «Octopus Intelligence: Jar Opening», 25 de febrero de 2003. <http://news.bbc.co.uk/1/hi/world/europe/2796607.stm> (consultado el 10 de octubre de 2016).
- Cao, W., Cudney, H. H. y Waser, R., «Smart Materials and Structures», en *PNAS*, vol. 96, n.º 15, 1999, pp. 8.330-8.331.
- Curie, J. y Curie, P., «Contractions et dilatations produites par des tensions dans les cristaux hémiédres à faces inclinées», en *Comptes rendus des hebdomadaires sesiones de l'Académie des Sciences*, vol. 93, 1881, pp. 1.137-1.140.
- Haines, C. S., et al. «Artificial Muscles from Fishing Line and Sewing Thread», en *Science*, vol. 343, n.º 6.173, 2014, pp. 868-872.
- Ilievski, F., Mazzeo, A. D., Shepherd, R. F., Chen, X. y Whitesides, G. M., «Soft Robotics for Chemists», en *Angewandte Chemie*, vol. 123, n.º 8, 2011, pp. 1.930-1.935.
- Jahromi, S. S. y Atwood, H. L., «Structural Features of Muscle Fibres in the Cockroach Leg», en *Journal of Insect Physiology*, vol. 15, n.º 12, 1969, pp. 2.255-2.258.
- Jin, S., Koh, A., Keplinger, C., Li, T., Bauer, S. y Suo, Z., «Dielectric Elastomer Generators: How Much Energy Can Be Converted?», en *IEEE/ASME Transactions On Mechatronics*, vol. 16, n.º 1, 2011.
- Keplinger, C., Sun, J. Y., Foo, C. C., Rothemund, P., Whitesides, G. M. y Suo, Z., «Stretchable, Transparent, Ionic Conductors», en *Science*, vol. 341, n.º 6.149, 2013, pp. 984-987.
- Kier, W. M. y Smith, K. K., «Tongues, Tentacles and Trunks: The Biomechanics of Movement in Muscular-hydrostats», en *Zoological Journal of the Linnean Society*, vol. 83, n.º 4, 1985, pp. 307-324.
- Kim, D. H., et al. «Epidermal Electronics», en *Science*, vol. 333, n.º 6.044, 2011, pp. 838-843.
- Knoop, E., Rossiter, J., «The Tickler: A Compliant Wearable Tactile Display for Stroking and Tickling», en *CHI 2015, 33rd Annual ACM, Conference on Human Factors in Computing Systems*, vol. 18, 2015, pp. 1.133-1.138.
- Lendlein, A. y Kelch, S., «Shape-memory Polymers», en *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 41, n.º 12, 2002, pp. 2.034-2.057.
- Mather, J. A., «Behaviour Development: A Cephalopod Perspective», en *International Journal of Comparative Psychology*, vol. 19, n.º 1, 2006.
- Meller, M. A., Bryant, M. y García, E., «Reconsidering the McKibben Muscle: Energetics, Operating Fluid, and Bladder Material», en *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 25, n.º 18, 2014, pp. 2.276-2.293.
- Morin, S. A., Shepherd, R. F., Kwok, S.W., Stokes, A. A., Nemiroski, A. y Whitesides, G. M., «Camouflage and Display for Soft Machines», en *Science*, vol. 337, n.º 6.096, 2012, pp. 828-832.
- Peline, R., Kornbluh, R., Pei, Q. y Joseph, J., «High-Speed Electrically Actuated Elastomers with Strain Greater Than 100%», en *Science*, vol. 287, n.º 5.454, 2000, pp. 836-839.
- Pfeifer, R. y Gómez, G., «Morphological Computation—Connecting Brain, Body, and Environment», International Symposium on Creating Brain-Like Intelligence, en *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 5.436, 2009, pp. 66-83.
- Polygerinos, P., Wang, Z., Galloway, K. C., Wood, R. J. y Walsh, C. J., «Soft Robotic Glove for Combined Assistance and at-Home Rehabilitation», en *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 73, 2015, pp. 135-143.
- Rossiter, J., Winfield, J. y Ieropoulos, I., «Here Today, Gone Tomorrow: Biodegradable Soft Robots», *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)*, Bellingham, Washington, SPIE, 2016.
- Rossiter, J., Yap, B. y Conn, A., «Biomimetic Chromatophores for Camouflage and Soft Active Surfaces», en *Bioinspiration & Biomimetics*, vol. 7, n.º 3, 2012.
- Rossiter, J. M., Takashima, K. y Mukai, T., «Thermal Response of Novel Shape Memory Polymershape Memory Alloy Hybrids», *Actas de SPIE: Behavior and Mechanics of Multifunctional Materials and Composites*, Bellingham, Washington, SPIE, 905810, 2014.
- Schokraie, E., et al. «Comparative Proteome Analysis of Milnesium Tardigradum in Early Embryonic State versus Adults in Active and Anhydrobiotic State», en *PLoS ONE*, vol. 7, n.º 9, 2012.
- Sender, R., Fuchs, S. y Milo, R., «Revised Estimates for the Number of Human and Bacteria Cells in the Body», en *PLoS Biology*, vol. 14, n.º 8, 2016.
- Shahinpoor, M. y Kim, K. J., «Ionic Polymer-metal Composites: I. Fundamentals», en *Smart Materials and Structures*, vol. 10, n.º 4, 2001.
- Tolley M. T., Shepherd, R. F., Mosadegh, B., Galloway K. C., Wehner, M., Karpelson, M., Wood, R. J. y Whitesides G. M., «A Resilient, Untethered Soft Robot», en *Soft Robotics*, vol. 1, n.º 3, 2014, pp. 213-223.
- Winslow, W. M., «Induced Fibrillation of Suspensions», en *J. Appl. Phys*, vol. 20, n.º 12, 1949, pp. 1.137-1.140.
- Wu, S. y Wayman, C., «Martensitic Transformations and the Shapememory Effect in Ti50Ni10Au40 and Ti50Au50 Alloys», en *Metallography*, vol. 20, n.º 3, 1987, p. 359.



**El cerebro
sensorial aumentado.
Cómo conectarán los
humanos con el
internet de las cosas**

JOSEPH A. PARADISO

Imagen de apertura:
Fachada del edificio Ray and Maria
State Center del Instituto Tecnológico
de Massachusetts (MIT, por sus siglas
en inglés), obra del premio Pritzker de
arquitectura Frank Gehry



Joseph A. Paradiso

Responsive Environments Group, MIT Media Lab,
Cambridge, Massachusetts, EEUU

Joseph A. Paradiso es titular de la cátedra Alexander W. Dreyfoos (1954) en Artes y Ciencias Multimedia en el Media Lab del Massachusetts Institute of Technology, donde dirige el grupo dedicado a entornos interactivos. Se licenció en Ingeniería Electrónica en la Tufts University en 1977, se doctoró en Física en el MIT en 1981 y se incorporó al MIT Media Lab en 1994. En la actualidad investiga cómo las redes de sensores aumentan y modifican la experiencia, la interacción y la percepción humanas y sus trabajos incluyen el estudio de sistemas inalámbricos de sensores, las redes de sensores ponibles y corporales, el cultivo de energía, la gestión de potencia para sensores integrados, la computación ubicua, las interfaces humano-ordenador, la música electrónica y los medios interactivos. Con anterioridad ha trabajado en física de alta energía, control de naves espaciales y sonares submarinos.

El internet de las cosas parte de la premisa de la ubicuidad de entornos dotados de sensores. Sin los sensores, los motores cognitivos de este mundo, lleno de dispositivos activos, estarían ciegos, sordos y mudos y no podrían dar una respuesta relevante a los acontecimientos del mundo real que pretenden aumentar. La última década ha sido testigo de un sinfín de avances, gracias al modo en que los sensores tienden a sacar partido de la ley de Moore. En este sentido, parece haber una creciente proliferación de sensores de todo tipo y en todas partes, lo que indica una fase de transición inminente cuando estén bien conectados en red, del mismo modo que fuimos testigos de un cambio fundamental en nuestra interacción con los ordenadores cuando aparecieron los buscadores web. Este cambio creará un sistema nervioso electrónico continuo que cubrirá el planeta. Por lo tanto, uno de los principales retos de la comunidad computacional actual radica en cómo integrar este sistema de sensores «omnisciente» y en rápida evolución en la percepción humana. Este artículo aborda algunos aspectos de esta revolución en ciernes a través de varios proyectos recientes o en desarrollo de mi grupo de investigación y el MIT Media Lab, que enfocan esta cuestión desde diferentes perspectivas.

INTRODUCCIÓN

Del mismo modo que Vannevar Bush vaticinó los entornos multimedia, el ordenador personal y tantas cosas más en su influyente artículo de 1945,¹ Mark Weiser predijo el internet de las cosas en un artículo de similar trascendencia publicado en 1991.² Mientras que el artículo de Bush, que se basaba en extrapolaciones a partir de la tecnología de la Segunda Guerra Mundial, tenía sobre todo un carácter especulativo, Weiser ilustraba el futuro que estaba prediciendo mediante sistemas realmente funcionales que él o sus colegas habían desarrollado (y con los que ya convivían) en Xerox PARC. Con una perspectiva que partía de la interacción persona-ordenador (IPO), Weiser y su equipo analizaban la manera en la que las personas interactuarían con la computación en red distribuida por su entorno y los artefactos que las rodeaban. Aunque ya eclipsada por el llamado «internet de las cosas», gestado en



fechas mucho más recientes en instalaciones industriales/académicas apasionadas de la tecnología de la identificación por radiofrecuencia (RFID, por sus siglas en inglés), en plena evolución, la visión de Weiser de una «computación ubicua» encontró aceptación entre muchos de los que entonces trabajábamos en el área de la ciencia computacional relacionada con la interacción humana. Incluso dentro de nuestra misma comunidad y antes de que se impusiera el término «internet de las cosas» (IdC), esta visión podía adoptar muchos nombres y matices a medida que las diferentes facciones intentaban consolidar su propia marca (en el Media Lab lo llamábamos «cosas que piensan» [en inglés, con el juego de palabras «*things that think*»], mis colegas del Laboratorio de Ciencia Computacional del MIT lo denominaron Project Oxygen, otros «computación omnipresente», «computación ambiental», «ordenador invisible», etcétera), pero sus raíces seguían en la visión primigenia de Mark de lo que a menudo abreviamos como «UbiComp» (por «computación ubicua»).

Cuando me incorporé al MIT Media Lab en 1993, era un físico especialista en alta energía que trabajaba en detectores de partículas elementales (que se pueden considerar «sensores» extremos) en el entonces recién cancelado Supercolisionador Superconductor y en el Gran Colisionador de Hadrones del CERN, que daba sus primeros pasos. Dado que tenía facilidad por la electrónica ya desde niño y que había estado diseñando y fabricando grandes sintetizadores de música desde principios de la década de 1970,³ mi primera investigación en el Media Lab implicó la incorporación de nuevas tecnologías en sensores a dispositivos novedosos de interfaz persona-ordenador, que en muchos casos se empleaban para el control de la música.⁴ A medida que las tecnologías inalámbricas ganaban en facilidad de integración, el trabajo de mi grupo de investigación desplazó su atención, a finales de la década de 1990, hacia varios aspectos de los sensores inalámbricos y las redes de sensores, siempre con un enfoque antropocéntrico.⁵ En la actualidad observamos que la mayor parte de nuestros proyectos sondan vías por las cuales la percepción y las intenciones humanas se puedan conectar de un modo continuo con ese «sistema nervioso» electrónico cuya presencia se consolida a nuestro alrededor. Este artículo aborda la esencia de este tema desde la perspectiva de los sensores, a través de proyectos de mi grupo de investigación que ilustran el modo en que las revoluciones en la capacidad de detección están transformando la conexión del ser humano con su entorno por muchas vías distintas.

SENSORES INERCIALES Y PRENDAS INTELIGENTES

Las personas notan la reacción inercial y gravitacional a través de la propiocepción de los miembros y el sentido vestibular del oído interno. Su equivalente electrónico lo constituyen los sensores inerciales, antes empleados para aplicaciones de alto nivel como la navegación aérea y espacial,⁶ pero que ahora son ya un bien de consumo. Los acelerómetros basados en sistemas microelectromecánicos (MEMS, por sus siglas en inglés) se remontan a prototipos académicos de 1989 y a chips comerciales procedentes de Analog Devices, de uso extendido en la década siguiente⁷ y que, gracias a su técnica exclusiva, les permitía aunar MEMS y electrónica en un solo chip. Todavía demasiado toscos para aplicaciones de navegación más allá de la podometría básica⁸ o la navegación a estima por pasos,⁹ se están introduciendo en muchos productos de consumo sencillos, como juguetes, teléfonos



y dosímetros y sensores de desplazamiento deportivos (en los cuales sirven sobre todo para detectar la actividad) o para interfaces basadas en la inclinación, como al girar una pantalla. De hecho, el acelerómetro es quizás el sensor de uso genérico más extendido del mercado en la actualidad, y estará integrado en casi cualquier dispositivo sujeto a movimiento o vibración, aunque solo sea temporal, para después dejar paso a sensores más elaborados de muy baja tensión (un área que exploramos hace mucho tiempo).^{10,11} Los giroscopios basados en MEMS han avanzado mucho más allá de los originalmente fabricados por el Draper Lab¹² en la década de 1990. Estos también se han consolidado, pero sus elevados costes y su mayor consumo eléctrico (al necesitar un resonador interno con alimentación no han podido bajar de un consumo de corriente del orden de 1 mA y son difíciles de ajustar a un ciclo de trabajo eficiente, ya que tardan un tiempo significativo en arrancar y estabilizarse)¹³ les impiden en gran medida penetrar en el mercado en estos momentos. Sin embargo, se están generalizando en los *smartphones*, los visores de realidad aumentada, las cámaras e incluso los relojes y las pulseras de gama alta, con fines de detección de gestos, detección de rotación, compensación del movimiento, detección de la actividad, aplicaciones de realidad aumentada, etcétera. Se suelen combinar con magnetómetros que indican la orientación real respecto al terreno a partir del campo magnético del planeta. En cuanto a los acelerómetros triaxiales, están ya presentes por defecto y también ha habido giroscopios triaxiales en producción. Por añadidura, desde 2010 hemos asistido a la aparición de productos comerciales que efectúan las funciones de ambos y proporcionan así una unidad de medición inercial en seis ejes en un solo chip, junto a un magnetómetro en tres ejes (empezando, por ejemplo, por el MPU-6000/6050 de InvenSense, seguido por dispositivos más recientes de esta misma empresa o de STMicroelectronics, Honeywell, etcétera).¹⁴

El MIT Media Lab ha sido pionero en aplicaciones de sensores inerciales para interfaces de usuario y sensores ponibles¹⁵, y muchas de estas ideas se gestaron en mi grupo hace 20 años.¹⁶ Desde hace una década, aprovechando un proyecto todavía más antiguo que exploraba los sensores inalámbricos ponibles para bailarines,¹⁷ mi equipo ha utilizado sensores de inercia que se llevan puestos para medir los parámetros biomecánicos de los jugadores profesionales de béisbol, en colaboración con médicos del Massachusetts General Hospital.¹⁸ Dado que los atletas pueden efectuar enormes rangos de movimiento, debemos ser capaces de medir las actividades máximas de hasta 120 G y 13.000 °/s, sin dejar de contar con una resolución significativa dentro del rango de movimiento normal de 10 G y 300 °/s. En última instancia, esto implicaría una unidad de medida inercial (UMI) con sensibilidad logarítmica, pero, como todavía no las hay disponibles, hemos integrado componentes inerciales de doble rango en nuestro dispositivo y hemos mezclado ambas señales mediante matemática. Empleamos la conexión de radio, sobre todo, para sincronizar nuestros dispositivos con una tasa de muestreo superior a nuestra tasa de 1 ms y escribimos los datos de continuo en una memoria *flash* extraíble, lo que nos permite recoger los datos de todo un día de mediciones y analizarlos para determinar las características descriptivas y predictivas del rendimiento atlético.¹⁹ Está surgiendo un sinfín de productos comerciales destinados a recoger datos de actividad atlética en todo un abanico de deportes, desde el béisbol hasta el tenis,²⁰ y en el futuro incluso los atletas aficionados irán equipados de dispositivos ponibles que les ayudarán a controlar su entrenamiento de un modo automático, individualizado o aumentado.





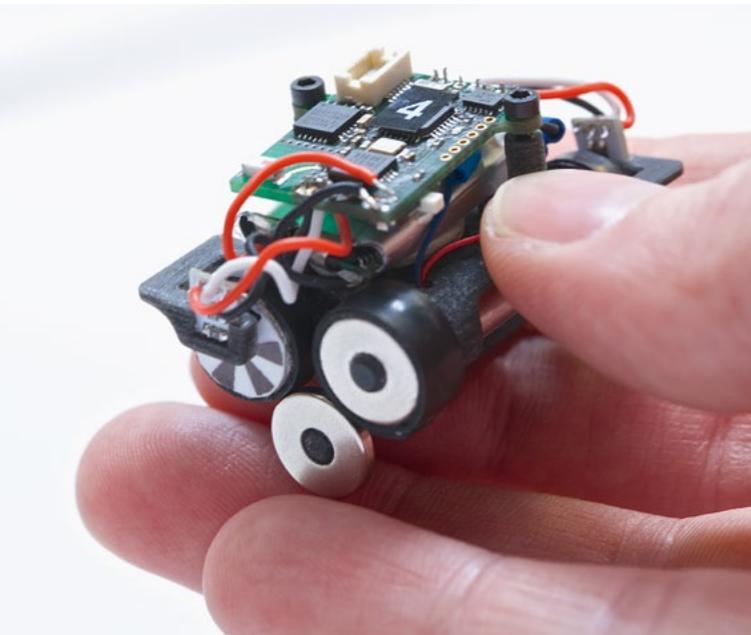
La potencia de los acelerómetros también ha descendido muchísimo: contamos ya con acelerómetros capacitivos de tres ejes que consumen menos de 1 mA y con acelerómetros de uso especializado (por ejemplo, dispositivos diseñados de origen para mecanismos implantables)²¹ con consumos inferiores a 1 μ A. Los acelerómetros piezoeléctricos pasivos también han encontrado aplicación en el campo de la computación ubicua.²²

También se han introducido varios tipos de sensores en los tejidos y la ropa. Pese a que la monitorización de la salud y el ejercicio han sido los principales polos de atracción de los científicos a este campo,²³ se han desarrollado indicadores de tensión sobre tejido, sensores de doblado, sensores de presión, electrodos bioeléctricos, sensores táctiles capacitivos e, incluso, antenas de RFID cada vez más fiables y robustas,²⁴ lo que ha convertido la ropa en un escenario importante del trabajo en interfaces de usuario. Algunos proyectos recientes de gran notoriedad, como el proyecto Jacquard de Google,²⁵ bajo el liderazgo técnico de Nan-Wei Gong, exmiembro de mi equipo de investigación, sugieren con rotundidad que la fabricación electrónica de tejido y ropa inteligentes evolucionará hasta superar nichos de mercado restringidos y exclusivos y se generalizará a medida que empiecen a surgir aplicaciones generales, quizás centradas en nuevos tipos de interacción.²⁶ Asimismo, investigadores de todo el mundo, como mi colega Yoel Fink,²⁷ del MIT, están replanteándose la naturaleza de lo que hoy entendemos como «hilo» para convertirlo en una fibra de silicona sobre la cual desarrollar la microelectrónica. Consciente de la infinidad de obstáculos que aún quedan en términos de robustez, producción, etcétera, la comunidad investigadora se está movilizando²⁸ para transformar estas y otras ideas relativas a la electrónica flexible en sustratos funcionales radicalmente nuevos con un impacto potencial en la medicina, la moda y la vestimenta (desde el ocio hasta los trajes espaciales y los entornos militares o peligrosos) e introducir la electrónica en todos los objetos elásticos o maleables.

Más allá de los sistemas posibles se sitúa la electrónica instalada directamente o incluso pintada sobre la piel. Una reciente investigadora posdoctoral de mi grupo, Katia Vega, es pionera en esta tecnología, encarnada en lo que denomina «tecnología de la belleza».²⁹ Mediante el uso de maquillaje funcional que toma datos de conductores, sensores y actuadores de iluminación o cambio de color,³⁰ Katia y sus colegas han elaborado interfaces dérmicas que reaccionan ante los gestos faciales o táctiles y envían mensajes, se iluminan o cambian el color aparente de la piel con un colorete electroactivo. Últimamente, Katia ha explorado aplicaciones médicas, como tatuajes que pueden cambiar de aspecto en función de indicadores transportados por la sangre.³¹

Vivimos en una era que ha empezado a sacar partido a nuestras muñecas desde un punto de vista técnico, como atestiguan los relojes inteligentes ya generalizados. Sin embargo, estos dispositivos suelen consistir en periféricos con pantalla táctil conectados a un *smartphone* o funcionan como monitores de actividad mejorados como los ya presentes en el mercado desde 2009. Considero que la muñeca adquirirá un papel clave para la interfaz de usuario del futuro, pero no del modo aplicado en los relojes inteligentes de hoy. Es decir, las interfaces del usuario sacarán partido de las UMI en la muñeca y de una localización precisa en interiores para procesar los gestos y señalar:³² los gestos con los dedos seguirán siendo importantes para la comunicación (puesto que el dedo humano tiene una gran capacidad sensorial y motora), pero en lugar de usar pantallas táctiles detectaremos los gestos dactilares desde sensores integrados en pulseras inteligentes, sin necesidad de mover los brazos. En los últimos

Los Rovables, un enjambre de robots en miniatura diseñados para desplazarse y navegar por la ropa. Un rodillo magnético en el interior de la tela fija los robots a la superficie de la ropa y pueden recargarse solos cuando están cerca de una bobina de inducción integrada en la prenda de vestir



años, mi equipo ha desarrollado varios prototipos iniciales de trabajo que lo consiguen. Uno, mediante sensores de RFID pasivos en anillos que se llevan en la articulación distal de los dedos y se monitorizan desde un lector de muñeca,³³ otro mediante una cámara 3D de corto alcance que escruta la palma de la mano, desde la muñeca hasta los dedos,³⁴ y otro que se sirve de una muñeca que genera imágenes por presión y que puede detectar el desplazamiento de los tendones.³⁵ Mi pupilo Artem Dementyev y su colaboradora Cindy Kao también han convertido un panel táctil inalámbrico en una uña falsa, dotada de una batería que le permite varias horas de uso continuado³⁶ y que posibilita la interacción digital en, valga la redundancia, las puntas de los dedos. Por consiguiente, imagino que las personas del futuro, de camino al trabajo en un atestado autobús con piloto automático, no irán con la cabeza gacha mirando su *smartphone*, sino al frente, al dispositivo que llevan puesto en la cabeza, mientras navegan por sus comunicaciones (en gran medida adaptadas al contexto) gracias al movimiento de los dedos, con ambos brazos inmóviles y pegados al cuerpo.

Junto a mi antiguo alumno Mat Laibowitz, introdujimos el concepto de *movilidad parásita* hace más de una década.³⁷ Planteábamos que unos nodos sensores de baja potencia podrían recolectar *movilidad*, y no solo energía, en su entorno, saltando de un agente en movimiento a otro. En la actual era de drones desplegados desde furgonetas de reparto, dicho concepto dista de ser radical. Nuestros ejemplos convertían a las personas en agentes móviles, mientras que los nodos eran pequeños robots que podían «agarrarse» a un individuo de varias maneras (inspirados en las pulgas y las garrapatas, entre otros seres del mundo animal), para después apearse en el lugar de su elección. En época reciente, mi actual pupilo Artem Dementyev, junto a Sean Follmer de Stanford y otros colaboradores, han introducido un enfoque pionero sobre los robots ponibles en sus Rovables.³⁸ Se trata de robots muy pequeños (por ejemplo, de unos 2 cm) que navegan por la ropa de un usuario y eligen la localización idónea para llevar a cabo una tarea, que puede ir desde la toma de datos médicos a las emisiones visuales dinámicas. Este proyecto propone una forma extrema de colaboración muy estrecha entre persona y robot que podría tener profundas repercusiones.

CÁMARAS OMNIPRESENTES Y SENSORES UBICUOS

En 1984, de Orwell,³⁹ era el gobierno del totalitario Gran Hermano el que ponía las cámaras de vigilancia en cada televisor, pero en la realidad de 2016 son las empresas de electrónica de consumo las que integran cámaras en los receptores de televisión corrientes y en todos los dispositivos móviles. De hecho, las cámaras se están convirtiendo en un bien de consumo habitual y, a medida que se reduzca el consumo de la extracción de características por vídeo mediante un *hardware* específico y otros sensores de micropotencia determinen la necesidad de tomar una imagen, se harán todavía más comunes como soportes de sensores genéricos integrados. Los primeros chips comerciales CMOS para cámara totalmente integrados procedían de la empresa VVL (que ahora pertenece a STMicroelectronics), de Edimburgo, a principios de la década de 1990.⁴⁰ En ese momento, la densidad en píxeles era reducida (valga el ejemplo del VVL Peach con 312 x 287 píxeles) y la principal aplicación comercial de sus dispositivos era la BarbieCam, una videocámara de juguete que vendía Mattel. Fui uno de los primeros usuarios de estas cámaras digitales, que empleé en 1994 para un sistema multicámara



de alineamiento de precisión en el Supercolisionador Superconductor.⁴¹ El sistema evolucionó hasta convertirse en el *hardware* empleado para alinear de un modo continuo y con una precisión de micras el sistema de muones de 40 metros del detector ATLAS del Gran Colisionador de Hadrones del CERN. Esta tecnología estaba bien posicionada para un crecimiento rápido y, hoy en día, las cámaras integradas nos miran desde todas partes, desde los ordenadores portátiles hasta los teléfonos móviles, con resoluciones típicas de montones de megapíxeles, y son responsables de una difusión cada vez más masiva de la fotografía digital. Los circuitos integrados de aplicación específica (CIAE) dedicados al procesamiento básico de imágenes suelen estar integrados o encastrados en las cámaras, lo que aporta una capacidad creciente de procesamiento de vídeo acompañada de un consumo eléctrico en reducción continua. El mercado de los teléfonos móviles ha sido la fuerza impulsora de este empeño, pero cada vez más las instalaciones estáticas (sensores de movimiento, contexto o gestualidad basados en vídeos y situados en casas inteligentes) y la realidad aumentada constituirán una importante aplicación de consumo. Asimismo, la consiguiente necesidad de procesamiento de imágenes integrado supondrá una reducción de la potencia consumida y un incremento de su agilidad. Somos ya testigos de ello en niveles extremos, como en las Microsoft HoloLens recién sacadas al mercado, dotadas de seis cámaras, la mayor parte de las cuales se emplean para un mapeo rápido del entorno, el seguimiento de la ubicación y el registro de imágenes; todo ello en una unidad independiente de realidad aumentada que se lleva en la cabeza, es ligera y está alimentada por batería. Las cámaras 3D también lo están invadiendo todo y se abren paso en el mercado de masas a través de la Microsoft Kinect, creada hace media década alrededor de la luz estructurada. Por otra parte, las cámaras 3D basadas en el denominado «tiempo de vuelo» (cuyos pioneros en los CMOS a principios de los años 2000 fueron los investigadores de Canesta)⁴² han evolucionado hasta desplazar, en los últimos tiempos, a los enfoques fundamentados en la luz estructurada. Por su parte, los desarrolladores de todo el mundo se apresuran a reducir lo suficiente el consumo y el volumen de estos dispositivos para integrarlos en los dispositivos móviles corrientes (una versión muy pequeña de este tipo de dispositivos ya se ha integrado en las HoloLens). A medida que se gane precisión en la medición de la velocidad de los píxeles, las aplicaciones que cuentan fotones en la fotografía computacional, como aquellas en las que trabaja mi colega Ramesh Raskar, del Media Lab, prometen dar lugar a nuevas aplicaciones revolucionarias y capaces de, por ejemplo, reducir el nivel de difusión y ver lo que hay a la vuelta de las esquinas.⁴³

Mi grupo de investigación empezó a explorar esta introducción de las cámaras ubicuas hace más de una década, con especial atención a aplicaciones que relacionan la información de vídeo con datos simultáneos de sensores ponibles. Nuestros estudios iniciales estaban basados en una plataforma llamada Portals,⁴⁴ con unos dispositivos especiales formados por una cámara integrada que transmitía a un procesador híbrido TI DaVinci DSP/ARM, rodeado de un núcleo de sensores básicos (de movimiento, audio, temperatura/humedad y proximidad por infrarrojos) y combinado con un transceptor ZigBee RF. Dispersamos 45 de estos dispositivos por todo el complejo del Media Lab, interconectados por la red por cable del edificio. Sobre esta base creamos la aplicación SPINNER,⁴⁵ que etiquetaba los vídeos de cada cámara con los datos de cualquier sensor ponible cercano. El sistema SPINNER se apoyaba en la idea de poder solicitar información a la base de datos de vídeos





con parámetros de un nivel superior, utilizando los datos de los sensores para constituir un espacio de información social o afectiva.⁴⁶ A partir de este espacio, se intenta formular una petición secuencial de información a modo de narrativa sencilla que implica a sujetos humanos dotados de dispositivos ponibles. Mediante este sistema, los clips de vídeo de grandes bases de datos que contuvieran cientos de horas de metraje se seleccionarían de un modo automático para ajustarse mejor a las horas especificadas en la petición, con lo que producirían vídeos editados que los observadores considerarían coherentes.⁴⁷ Este trabajo, que sin quererlo apuntaba al futuro de la telerrealidad, tenía su punto de mira más allá, ya que trataba de permitir que las personas usaran sistemas de sensores mediante peticiones e interacciones relevantes desde el punto de vista humano.

En lugar de intentar extraer historias a partir de la actividad en un ambiente pasivo, un proyecto en el que participó nuestro equipo concibió una cámara interactiva con el objetivo de obtener historias estructuradas a partir de las personas.⁴⁸ Con el formato de pequeño robot móvil, Boxie llevaba una cámara HD en uno de sus ojos; deambulaba por nuestro edificio y, si se quedaba atascado, solicitaba ayuda cuando se acercaba alguien. Entonces, mediante una serie de preguntas, pedía a la persona en cuestión que efectuara varias tareas (por ejemplo, trasladarlo a otra parte del edificio o explicarle qué se hace en la zona del edificio en la que ha sido encontrado), de modo que producía un vídeo indexado fácil de editar para conseguir algo así como un documental sobre los individuos que conviven con el robot.

En los próximos años, con la reducción del coste de las pantallas de vídeo de gran superficie (con el potencial de imprimirlas con rodillos) y su mejor integración en redes con capacidad de respuesta, veremos cómo se generaliza el despliegue de pantallas en todos los ámbitos. La información dirigida a nosotros se manifestará de la manera más conveniente (por ejemplo, en unas gafas inteligentes o en una pantalla cercana), de modo que, sin duda alguna, sacarse un teléfono del bolsillo y ejecutar una aplicación pronto será cosa del pasado. Para explorar esta perspectiva, mi equipo inició el proyecto Gestures Everywhere (gestos por doquier),⁴⁹ que daba uso a los grandes monitores situados sobre todas las zonas públicas de nuestro complejo de edificios.⁵⁰ Al contar ya con RFID para identificar a los portadores de tarjetas de identificación codificadas, añadimos un conjunto de sensores y una cámara Kinect 3D a cada emplazamiento con pantalla. Cuando alguien se aproximaba a una pantalla, era

identificado mediante RFID o reconocimiento por vídeo y la información más relevante sobre este aparecía en pantalla. Desarrollamos un marco de reconocimiento para la cámara Kinect que analizaba con detenimiento algunos gestos genéricos de las manos (por ejemplo, los que indican «siguiente», «con más detalle», «aléjate», etcétera), lo que permitía a los usuarios entablar una interacción básica con sus propios datos sin tocar la pantalla ni tener que sacar un dispositivo móvil del bolsillo. De hecho, las interacciones proxémicas⁵¹ alrededor de pantallas inteligentes ubicuas serán comunes en la próxima década.

La plétora de cámaras que diseminamos por nuestro edificio en el transcurso de nuestro proyecto SPINNER despertaron preocupación sobre la privacidad (a este respecto, es interesante que las cámaras Kinect de Gestures Everywhere no suscitaran la misma reacción: o bien los residentes no las consideraban cámaras o bien se estaban haciendo a la idea de la visión ubicua). En consecuencia, instalamos un interruptor de corriente muy visible en cada portal que permitía apagarlas con facilidad. Sin embargo, es una solución muy artificial y, además, en un futuro nuestro entorno cercano sencillamente albergará demasiadas cámaras y sensores invasivos de otro tipo que apagar. Estos dispositivos deben regirse por protocolos seguros y verificables que guíen el flujo de datos de un modo dinámico y adecuado para responder a las exigencias de privacidad del usuario. Diseñamos un pequeño dispositivo inalámbrico que controlaba nuestros portales para estudiar posibles soluciones a estos problemas.⁵² Emitía una señal a sus aledaños que desactivaba de un modo dinámico la transmisión de audio y vídeo de las proximidades y otras características derivadas en función de las preferencias de privacidad declaradas por el usuario; el dispositivo contaba con un gran botón de emergencia que se podía pulsar en cualquier momento cuando se deseaba privacidad inmediata, de modo que bloqueaba el audio y el vídeo emitidos por portales cercanos.

En lugar de bloquear toda la emisión de vídeo en directo, hemos probado a eliminar de la imagen de vídeo a la persona que desea privacidad. Mediante la información aportada por sensores ponibles, podemos identificar con mayor facilidad a la persona apropiada en la imagen⁵³ y fundirla con el fondo de la imagen. También estamos estudiando una iniciativa opuesta: el uso de sensores ponibles para detectar parámetros ambientales que indiquen condiciones de riesgo potencial para los trabajadores de la construcción y renderizarlos (visualizarlos) de diferentes modos sobre una emisión de vídeo en tiempo real, para destacar a los trabajadores en una situación de peligro más aguda.⁵⁴



«Cuando la técnica inalámbrica se aplique a la perfección, toda la tierra se convertirá en un enorme cerebro —en realidad, lo es—; y todas las cosas serán partículas de un todo genuino y rítmico.»

NIKOLA TESLA (1856-1943)

Inventor, ingeniero mecánico, ingeniero eléctrico y físico croata. Está considerado el padre de la tecnología moderna

Seiko Mikami y Sota Ichikawa

Gravicells, Gravity and Resistance Project (2004)
Instalación interactiva. Yamaguchi Center for Arts and Media (YCAM), Yamaguchi, Japón



GESTIÓN DE LA ENERGÍA

La energía necesaria para captar y procesar ha descendido de un modo constante. Tanto los sensores en sí como los sistemas con sensores integrados han sacado todo el partido de la electrónica de bajo consumo de potencia y de la gestión inteligente de la potencia.⁵⁵ De un modo similar, la microgeneración (o «recolección») de energía, antaño una curiosidad muy innovadora, se ha convertido en un empeño generalizado con ecos a lo largo y ancho de la comunidad de los sensores integrados.^{56, 57} El modo apropiado de microgenerar depende en gran medida de la naturaleza de la reserva de energía ambiental. En general, en entornos habitados las celdas solares tienden a ser la mejor elección (proporcionan más de 100 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ en interiores, en función de los niveles lumínicos, etcétera). En otros contextos, los microgeneradores por vibración y termoeléctricos se pueden emplear en presencia de niveles suficientes de vibración o transferencia de calor (por ejemplo, en vehículos o sobre el cuerpo),^{58, 59} al tiempo que la aplicación de microgeneradores de radiofrecuencias de ambiente⁶⁰ ha dejado de ser infrecuente. En la mayoría de aplicaciones prácticas que restringen el volumen y el área superficial, no obstante, una batería integrada puede constituir una mejor solución, a tenor de la vida útil esperada del dispositivo y teniendo en cuenta que la limitada potencia que proporciona el microgenerador puede resultar muy restrictiva para el consumo de corriente de la electrónica. Otra solución consiste en proyectar haces de energía magnética o de radiofrecuencia sobre sensores sin baterías, como en los sistemas de RFID. Popularizados en nuestra comunidad gracias al WISP de Intel⁶¹ (usado por mi equipo para los anteriormente mencionados anillos detectores del movimiento dactilar),⁶² empezaron a surgir los sistemas comerciales alimentados por radiofrecuencia (por ejemplo, Powercast, WiTricity, etcétera), aunque cada uno tiene sus lagunas (como una potencia limitada o una elevada densidad del flujo magnético). Hoy en día, de hecho, en los cafés de moda es habitual encontrar «discos» inductivos que, cuando están encima de las bobinas primarias encastradas debajo de la mesa, sirven para cargar los teléfonos móviles; a su vez, algunos teléfonos móviles cuentan con bobinas de carga integradas bajo la carcasa, pero apenas se usan, dado que es más práctico usar un cable/conector USB, que se encuentra en cualquier parte y, a diferencia de los dispositivos inductivos proximales, permite cargar en cualquier posición. En mi opinión, debido a su practicidad perfectible, su alto nivel de desperdicio de energía (de especial relevancia en nuestros tiempos de ahorro) y los potenciales problemas para la salud (sobrevalorados en gran medida,⁶³ pero más importantes para los portadores de un marcapasos, etcétera), la transferencia inalámbrica de energía se limitará sobre todo a aplicaciones específicas o de baja potencia, como los sensores microenergéticos sin acceso a la luz necesaria para la energía fotovoltaica y, quizás, armarios o estanterías especiales para poner a cargar nuestros dispositivos ponibles en casa.

La popularización del interés por la microgeneración de energía ha precipitado la concepción de un abanico de circuitos integrados dedicados a gestionar y regular las aportaciones instantáneas de energía que estos aparatos suelen producir (por ejemplo, grandes proveedores de circuitos integrados como Linear Technology y Maxim), de modo que tal vez se haga realidad el sueño de integrar en un solo chip la microgeneración, la regulación de potencia, los sensores, el procesamiento y, tal vez, la función inalámbrica (al menos para el funcionamiento con ciclos de trabajo extremadamente reducidos o en entornos con



grandes acumulaciones de energía ambiental). De hecho, el sueño de un «polvo inteligente» o *smart dust*⁶⁴ se ha hecho realidad en algunos prototipos iniciales, como el conjunto de obleas creado por la Universidad de Michigan que emplea la cámara que lleva incorporada como microgenerador óptico de energía.⁶⁵ Este campo ganará todavía más importancia con la iniciativa recientemente anunciada de producir los sensores en enjambre, con pesos de alrededor de 1 g y acelerados por láser, para el proyecto Star Wisp, destinado a la exploración interestelar de alta velocidad.⁶⁶

Aunque el público comúnmente a menudo confunde la microgeneración de energía con las fuentes de energía sostenibles,⁶⁷ la cantidad de energía microgenerable en entornos habitados convencionales es muy inferior a la necesaria para lograr una verdadera contribución a las necesidades energéticas de la sociedad. Por otra parte, los sistemas de sensores de muy baja potencia, quizás aumentados por la microgeneración energética, minimizan o eliminan la necesidad de cambiar las baterías, de manera que reducen los gastos generales de despliegue y, por tanto, fomentan la penetración de los sensores ubicuos. La información derivada de estos sensores integrados puede, pues, emplearse para minimizar de un modo inteligente el consumo de energía en entornos construidos, lo que promete un grado de conservación y utilidad fuera del alcance de los actuales termostatos y controles de iluminación discretos.

Los trabajos de este tipo, que se remontan a la Smart Home (casa inteligente) de Michael Moser,⁶⁸ se han convertido en los últimos tiempos en algo así como el foco de atención de los círculos dedicados a la computación ubicua, ya que varios de los grupos de investigación han emprendido proyectos sobre gestión inteligente y adaptativa de la energía mediante sensores omnipresentes.⁶⁹ En mi grupo, por ejemplo, mi entonces pupilo Mark Feldmeier utilizó *cantilevers* piezoeléctricos de bajo coste basados en chips para crear un detector de actividad de pulsera que integra un dispositivo microenergético (antes de la llegada de las pulseras de ejercicio comerciales) y un monitor ambiental para un controlador de climatización.⁷⁰ Más allá de los sistemas comerciales introducidos a posteriori, como el famoso termostato Nest, un dispositivo ponible brinda una perspectiva en primera persona y más directa del confort que un sensor estático colocado en una pared, además de que es móvil por naturaleza, de modo que puede ejercer su control de la climatización en cualquier habitación u oficina habilitada para ello. Gracias al procesamiento analógico, este integrador continuo de actividad funciona a menos de 2 μ A, lo que permite a nuestro dispositivo (además de sus otros componentes, que también miden y transmiten la temperatura, la humedad y el nivel lumínico en intervalos de un minuto) funcionar durante más de dos años con una pequeña batería de botón, pese a actualizarse una vez por minuto cuando está dentro del alcance de nuestra red. En esencia, los datos de este dispositivo de pulsera han servido para captar la «sensación de confort» del usuario y adaptar el sistema de climatización de nuestro edificio al confort de las personas presentes en este, en función de lo inferido de los datos procedentes del sensor ponible, discriminados de acuerdo con las etiquetas «caliente» y «frío» procedentes de la pulsación de los botones del dispositivo. Estimamos que el sistema de climatización regido por nuestro sistema consumía cerca del 25% menos de energía y que sus usuarios sentían una mejora significativa del grado de confort.⁷¹ En los últimos tiempos, otros actores, como Schneider Electric, en Grenoble,⁷² han desarrollado sensores similares de tipo inalámbrico y microenergético, pero se utilizan en una ubicación fija. La unidad de Schneider, que mide la temperatura, la humedad y los niveles de CO₂ minuto a minuto y carga las lecturas mediante





una red ZigBee, está alimentada por una pequeña célula solar; un día de luz normal de interior basta para alimentar este dispositivo durante un máximo de cuatro semanas (sin ir más lejos, la duración típica de las vacaciones en Francia).

El control de la iluminación es otra aplicación que puede beneficiarse de la computación ubicua. Pero no solo para la gestión de la energía, también para responder al reto para la interfaz del usuario que plantean los sistemas de iluminación actuales. Pese al sinfín de posibilidades de actuación de los fluorescentes y las luces en estado sólido, por lo general en red y controlados por vía digital, la interfaz humana sufre sus consecuencias, ya que la iluminación (en especial, la comercial) suele estar gestionada por crípticos paneles de control que convierten la selección de la iluminación deseada en una tarea, cuando menos, farragosa. Por consiguiente, echamos en falta la desaparición del sencillo interruptor de la luz, y mi grupo ha iniciado una serie de proyectos encabezados por mi estudiante Nan Zhao y por los exalumnos Matt Aldrich y Asaf Axaria para recuperarlo, aunque en formato virtual. Una de las vías sondeadas implica utilizar el retorno de un pequeño sensor de la luz incidente capaz de aislar la contribución de cada luz próxima a la iluminación total que llega al sensor, así como estimar la luz externa, no sujeta a control.⁷³ Nuestro algoritmo de control, basado en un sencillo programa lineal, puede efectuar un cálculo dinámico de qué distribución óptima en términos de energía proporcionará la iluminación deseada en la ubicación del sensor. En efecto, representa el regreso del interruptor de luz local encarnado en un pequeño dispositivo inalámbrico.

Nuestro trabajo continuo en esta área lleva la idea más lejos, con la incorporación de cámaras mediante la distribución de sensores de luz reflejada. Asimismo, puede proporcionar funciones que se podrían utilizar para el control interactivo de la iluminación. A partir de un análisis de componentes principales, hemos derivado un conjunto de ejes de control continuo para la iluminación distribuida, adecuados a la percepción humana⁷⁴ y que permiten un ajuste fácil e intuitivo de la iluminación en red. Del mismo modo, estamos haciendo funcionar este sistema a partir de los sensores ponibles de las gafas Google Glass, ajustando automáticamente la potencia lumínica para optimizar la iluminación de aquellas superficies y objetos que mira el usuario, así como derivando datos de contexto para la iluminación general; por ejemplo, es posible una transición sin saltos desde la iluminación apropiada para trabajar hasta una iluminación para ocasiones informales o sociales.⁷⁵ Nuestro trabajo más reciente en este campo también incorpora grandes pantallas (destinadas a gozar de una presencia ubicua) que modifican tanto sus imágenes o vídeo como su sonido e iluminación para mejorar el estado emocional o de atención del usuario en función de lo que detectan los sensores ponibles y las cámaras cercanas⁷⁶ y devolverlo a niveles sanos y productivos.

RADIO, UBICACIÓN, «RASTROS» Y MEDIOS SENSIBLES

La última década ha sido testigo de una enorme expansión de los sensores inalámbricos, con su consiguiente impacto en la actual computación ubicua. Las técnicas de trazado de circuitos impresos de señal mixta han permitido generalizar la integración de radios de silicio en la misma placa que unos procesadores de alta capacidad, lo que ha abierto las puertas a una gran cantidad de circuitos impresos de radio inteligentes y fáciles de usar, que en su mayoría admiten estándares muy extendidos, como ZigBee regido por 802.15.4. Empresas como Nordic,



TI/Chipcon y, más recientemente, Atmel, por ejemplo, fabrican dispositivos de uso habitual en esta familia. Pese a que existe una plétora de estándares inalámbricos relevantes para los sensores y que optimizan las diferentes aplicaciones (por ejemplo, ANT para funcionamiento en ciclos de trabajo reducidos, DASH-7 de Savi para la implementación de cadenas de suministros, WirelessHART para el control industrial, Bluetooth Low Energy para dispositivos de consumo, LoRaWAN para dispositivos de IdT de mayor alcance y variantes de wifi de baja potencia), ZigBee puede presumir de una larga trayectoria como estándar de comunicación por radiofrecuencia de baja potencia. Por otra parte, los módulos de sensores equipados con ZigBee son fáciles de conseguir y pueden funcionar con sistemas operativos derivados de la investigación en redes de sensores (tan antiguos, por ejemplo, como TinyOS)⁷⁷ o admitir el código de aplicaciones desarrolladas a medida. El funcionamiento multisalto se incluye por defecto en el protocolo de enrutado de ZigBee, pero las limitaciones en términos de batería suelen imponer el uso de fuentes externas de alimentación para los nodos de enrutado. Pese a que podría estar a punto de ser reemplazado por protocolos de desarrollo más reciente (como los anteriormente enumerados), mi equipo ha basado la mayor parte de sus instalaciones ambientales y estáticas en series (pilas) de protocolos ZigBee.

La ubicación en exteriores, con un margen de varios metros, es un campo dominado por el GPS durante mucho tiempo, pero los GPS diferenciales brindan una ubicación más precisa. Estos pronto serán mucho más comunes gracias a dispositivos recientes de bajo coste como las radios RTK (por las siglas en inglés de «cinemática en tiempo real») integradas en dispositivos GPS.⁷⁸ La ubicación en interiores es otra historia: resulta mucho más complicada, ya que las construcciones desvían la señal del GPS, y los ambientes interiores presentan líneas de visión limitadas y un exceso de trayectorias múltiples. Al parecer no hay una tecnología de ubicación indiscutiblemente superior en todas las situaciones de interior (como atestiguan los resultados de las últimas conferencias IPSN [por las siglas en inglés de «procesamiento de la información en las redes de sensores»] de la Indoor Location Competition [concurso de localización en interiores] que Microsoft celebra cada año),⁷⁹ pero el creciente esfuerzo de desarrollo que se le dedica deja entrever que la ubicación precisa en interiores pronto será una función habitual de los dispositivos ponibles, móviles y de consumo.

Las redes que funcionan con 802.15.4 (o, en este caso, 802.11) suelen ofrecer una capacidad de ubicación limitada basada en la RSSI (por las siglas en inglés de «intensidad de la señal de recepción») y la calidad del enlace radioeléctrico. Estas técnicas fundamentadas, en esencia, en la amplitud, sufren un nivel de error considerable a causa del comportamiento dinámico y complejo de la radiofrecuencia en interiores. Con información suficiente de múltiples estaciones base y sacando partido del estado anterior y de otras restricciones, se dice que estos sistemas de «huella digital» pueden localizar nodos móviles en interiores con una precisión de hasta 3 o 5 m.⁸⁰ Los sistemas de radiofrecuencia basados en el tiempo de vuelo prometen hacerlo mucho mejor. Se ha mostrado que, mediante el uso inteligente de los impulsos de fase diferencial de la radiofrecuencia en radios que transmiten al mismo tiempo en exteriores, se puede localizar una red de nodos eléctricos con una precisión de hasta 3 cm a una distancia de un campo de fútbol americano,⁸¹ mientras que las antenas direccionales consiguen una precisión mínima de cerca de 30 cm con el sistema HAIP de Nokia,⁸² por ejemplo. Sin embargo, la tecnología que está ganando terreno en la ubicación precisa y de bajo peso por radiofrecuencia es la banda superancha de baja potencia (UltraWideBand), que consiste en la sincronización precisa de impulsos de radio cortos de 5-8 GHz y que promete una precisión cercana al centímetro. Hace ya algún tiempo que hay disponibles productos comerciales de gama alta (por ejemplo, Ubisense para la ubicación en interiores y las radios de Zebra Technologies para la ubicación en instalaciones del tamaño de un estadio deportivo), pero los nuevos *chipsets* de empresas como DecaWave y Qualcomm (mediante su radio Peanut, en proceso de evolución) indican que esta tecnología pronto podría estar presente en todo. A su vez, la posibilidad futura de poder localizar con un margen de error de algunos centímetros tendrá repercusiones profundas (como ejemplos evidentes tenemos el geoperimetrage y las interfaces⁸³ de proximidad, pero esta capacidad influirá en todo).

Un ejemplo aportado por Brian Mayton, miembro de mi equipo, a partir de esta tecnología, era la pulsera WristQue.⁸⁴ Dotada de: 1) un sistema preciso de ubicación en interiores (mediante Ubisense), 2) una unidad de medida inercial completa en nueve ejes y 3) sensores para aplicar los sistemas de iluminación y climatización inteligentes anteriormente explicados. WristQue permite también el control de dispositivos, para lo que basta señalarlos y hacer un gesto con el brazo. Señalar algo es un modo intuitivo de comunicación humana y ha sido objeto de estudio por los sistemas basados en cámaras desde que se desarrolló el sistema antiguo Put That There (pon eso allí) en el MIT Media Lab durante la década de 1980.⁸⁵ No obstante, como WristQue conoce la posición de la muñeca con una precisión de centímetros gracias a la ubicación por radio (que pronto será ubicua) y el ángulo de la muñeca gracias a la UMI (calibrada para adaptarse a la distorsión magnética local), podemos extrapolar con facilidad el vector del brazo para determinar qué señala un usuario, sin necesidad de cámaras.

Las diferentes ubicaciones muestran también marcas electromagnéticas características o «rastros», que se pueden detectar mediante unos sencillos sensores capacitivos, inductivos, ópticos y de radiofrecuencia. Estas marcas proceden de las emisiones parásitas de las líneas eléctricas y de varias emanaciones locales de la iluminación modulada corriente y de otros equipos eléctricos. Asimismo, el cableado y la estructura de los edificios pueden influir en estas señales. Estas señales de fondo son portadoras de información relevante sobre el consumo de energía y el contexto (por ejemplo, qué aparato está haciendo qué y cuánta corriente está consumiendo), así como sobre la ubicación (dado que estas emanaciones de campo cercano o de radio limitado se atenúan enseguida). Los sistemas que explotan estas señales pasivas de fondo,



por lo general mediante un proceso de aprendizaje automático informatizado, se han puesto últimamente de moda en la investigación en computación ubicua, con aplicaciones en campos como la gestión no intrusiva de cargas eléctricas,⁸⁶ el seguimiento de manos a través de los muros⁸⁷ y la inferencia de gestos alrededor de lámparas fluorescentes.⁸⁸ Los sensores magnéticos de corriente continua también se han empleado para ubicar con precisión a personas dentro de edificios, ya que la orientación espacial del campo magnético terrestre cambia de un modo notable en función de la posición en el edificio.⁸⁹

Mi equipo se ha servido del uso de ruido electrónico de ambiente en dispositivos ponibles para analizar las características de un captador de acoplamiento capacitivo y, de este modo, identificar qué dispositivos se tocan e inferir sus modos de funcionamiento.⁹⁰ Nan-Wei Gong, entonces mi pupila, y yo mismo (en colaboración con Microsoft Research en el Reino Unido) desarrollamos un suelo-sensor electromagnético multimodal con los captadores y los circuitos básicos impresos mediante rodillos, un procedimiento poco costoso.⁹¹ Las celdas detectoras en red presentes en cada franja podían hacer un seguimiento de las personas que caminan sobre ellas mediante la inducción capacitiva de un zumbido de ambiente de 60 Hz, así como trazar la ubicación de un teléfono GSM activo o de un transmisor de campo cercano, gracias a sus emanaciones. Este es un ejemplo reciente de lo que hemos denominado *medios sensibles*:⁹² en esencia, la integración de redes de sensores de baja potencia en materiales comunes para otorgarles capacidades sensoriales, es decir, una «piel electrónica» con potencial de mejora. Nuestro trabajo más reciente en este campo ha producido la Sensor Tape,⁹³ un rollo de sensores integrados y en red sobre un sustrato flexible en forma de cinta adhesiva común. Aunque nuestra cinta sensora tiene muchos metros de largo, puede desenrollarse, cortarse y volver a empalmarse como sea necesario, así como adherirse a un objeto o superficie a voluntad para servir de sensor (nuestra cinta actual integra dispositivos como UMI y sensores de proximidad a un paso de cerca de 1 pulgada para distribuir su orden y orientación). También hemos probado a fabricar una cinta sensora con capacidad de utilizar sensores impresos y recibir alimentación pasiva,⁹⁴ lo que le permite la adhesión a superficies inaccesibles y materiales de construcción, para después recuperar la información por vía inalámbrica mediante lectores de comunicación de campo cercano (NFC, por sus siglas en inglés). Cuando los sensores no se pueden imprimir, también se pueden aplicar como pegatinas con un adhesivo conductor, como las creadas en primicia por mi estudiante Jie Qi y el graduado del Media Lab Andrew *Bunnie* Huang para aplicaciones educativas y de manualidades⁹⁵ con sus kits Chibitronics disponibles para su venta al público.

AGREGAR Y VISUALIZAR DATOS DE SENSORES DIVERSOS

Hemos sido testigos del auge de la circulación de datos de sensores en tiempo real por nuestras redes. Del mismo modo, la rápida expansión de los sensores inteligentes a todas las escalas no debería tardar en propiciar el predominio de la información de sensores en tiempo real en el tráfico de red. En estos momentos, la información de estos sensores está bastante compartimentada; por ejemplo, el vídeo se usa en las videoconferencias, la telefonía y las *webcams*, los datos de tráfico se muestran en las webs de tráfico, etcétera. Uno de los principales desafíos al que se enfrenta nuestra comunidad es derribar los muros entre estos nichos y desarrollar sistemas y protocolos que conecten, sin fisuras, estas categorías para





formar un entorno virtual de sensores en el cual todos los datos relevantes se combinen y fusionen de modo dinámico. Son varias las iniciativas que han empezado a tantear estas ideas de unificación de datos. Los sistemas basados en SensorML, Home Plug & Play y DLNA, por ejemplo, se han orientado a facilitar la transmisión de datos entre varias aplicaciones. Pachube (ahora Xively)⁹⁶ es un sistema exclusivo que permite a sus suscriptores subir sus datos a un amplio fondo común que, a continuación, puede ponerse a disposición de muchas aplicaciones diferentes. No obstante, estos protocolos adolecen de un éxito limitado por varias razones, como el afán de poseer todos los datos de uno y ponerles precio o la falta de aceptación entre los fabricantes. Algunas iniciativas recientes, como AllJoyn,⁹⁷ liderada por Qualcomm, o la alianza entre Open Interconnect (lanzada por Intel) e IoTivity,⁹⁸ tienen su punto de mira más centrado en el internet de las cosas y menos dominado por la electrónica de consumo. En lugar de esperar a que maduren estos protocolos un tanto farragosos, mi pupilo Spencer Russell ha desarrollado el nuestro, denominado CHAIN-API.^{99,100} CHAIN es un sistema de tipo RESTful (por las siglas en inglés de «transferencia de estado representacional») que reconoce la web y está basado en estructuras de datos JSON, de modo que es fácil de escrutar mediante herramientas en general disponibles para las aplicaciones web. Una vez que accede a internet, los datos del sensor se cuelgan en la red, se describen y se enlazan con otros datos de sensores en CHAIN. A través de CHAIN, las aplicaciones pueden recolectar datos procedentes de los sensores del mismo modo que hoy en día recopilan información estática de la red. Así, los datos relacionados entre sí pueden descentralizarse y residir en varios servidores (considero que en un futuro no habrá una única entidad «poseedora» de nuestros datos, porque estarán repartidos). Los recolectores surcarán sin cesar los datos enlazados en protocolos como CHAIN, calculando el estado y estimando otros parámetros derivados de los datos, lo que será a su vez subido en CHAIN como otro «sensor virtual». A modo de ejemplo, mi pupilo David Ramsay ha puesto en práctica un sistema llamado LearnAir,¹⁰¹ en el cual ha empleado CHAIN para desarrollar un protocolo para cargar datos desde sensores de calidad del aire y conformar un marco de aprendizaje automático. Este sistema corrige, calibra y extrapola dichos datos mediante la correcta combinación de: 1) datos ubicuos procedentes de sensores de bajo coste y 2) parámetros medidos a escala general que puedan influir en su estado (por ejemplo, la información meteorológica), fundamentando el resultado con datos de sensores de alta calidad (por ejemplo, con certificación EPA) que dependen de su proximidad. Gracias al auge de la ciencia ciudadana en los últimos años, sensores de varios niveles de calidad recogerán datos de todo tipo y en todas partes. En lugar de llegar a conclusiones potencialmente erróneas a partir de datos engañosos, LearnAir apunta a un futuro en el cual datos de todo tipo y de calidad variable se combinarán de un modo dinámico y bien regulado para permitir a las personas contribuir a un cuerpo abierto y común de datos que incorpore todos los datos del modo más adecuado.

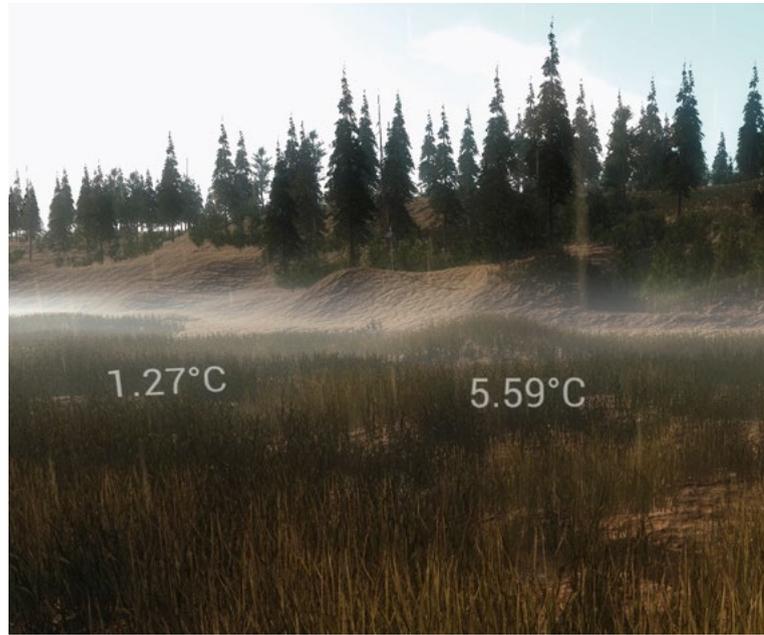
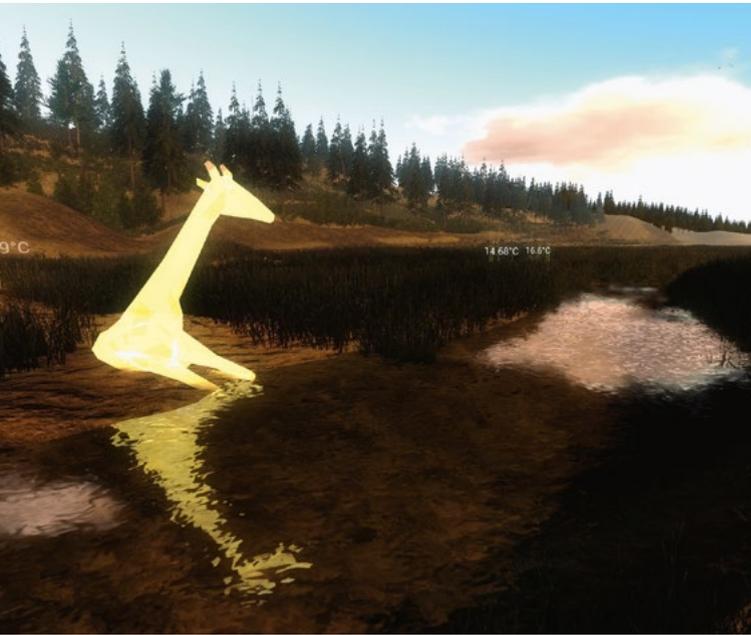
Los navegadores correspondientes a los datos de sensores ubicuos y multimodales desempeñarán un papel de primer orden, por ejemplo, en la configuración y depuración¹⁰² de estos sistemas y en la gestión de edificios o instalaciones. En

todo caso, una capacidad de búsqueda ágil sobre datos de sensores multimodales promete la llegada de aplicaciones nuevas y revolucionarias sobre las que apenas podemos especular en este momento. Una interfaz adecuada para este sistema de sensores artificiales apunta a la creación de algo así como una omnisciencia digital, que puede aumentar en gran medida la consciencia de una persona en términos temporales y espaciales. Sería, pues, una interesante puesta en práctica de los medios electrónicos que McLuhan caracterizaba como una extensión del sistema nervioso humano.¹⁰³

Denominamos este proceso Cross Reality¹⁰⁴ o realidad cruzada, es decir, un entorno omnipresente y aumentado en todos los aspectos, en el cual los datos de sensores se manifiestan con fluidez en mundos virtuales en los que se puede navegar de un modo intuitivo. Pese a que algunos investigadores se han dedicado a añadir sus datos de sensores a estructuras observables mediante Google Earth,¹⁰⁵ nosotros hemos usado el motor de un juego en 3D para navegar por los datos procedentes de nuestro propio edificio. Dado que los motores de juegos están concebidos para brindar eficiencia en los gráficos, la animación y la interacción, se adaptan a la perfección al desarrollo de este tipo de sensores cuya labor se enmarca en edificios (nuestro trabajo anterior utilizaba el entorno comunitario de realidad compartida SecondLife,¹⁰⁶ lo que resultaba muy restrictivo en relación con nuestros objetivos).

Nuestro actual sistema, denominado DoppelLab,¹⁰⁷ bajo la dirección de mi estudiante Gershon Dublon, visibiliza centenares de diversos sensores y fuentes de información relacionados con nuestro edificio a través de animaciones que aparecen en un mundo virtual común. Al navegar en DoppelLab podemos observar el funcionamiento del sistema de climatización del edificio, ver cómo se desplazan las personas por el edificio (gracias a las tarjetas con RFID y los sensores de movimiento), leer los mensajes públicos de Twitter que envían desde sus despachos e, incluso, ver en tiempo real los partidos de tenis de mesa que se juegan en una mesa virtual.¹⁰⁸ Asimismo, hemos incorporado a DoppelLab la navegación auditiva, que genera fuentes de audio *espacializadas*; es decir, proceden de micrófonos situados por todo nuestro edificio y se identifican de acuerdo con la posición del usuario en el edificio virtual. Por razones de privacidad, algunas pequeñas partículas sonoras (*granos*) aleatorias se invierten o se borran directamente en el nodo sensor, lo que hace que las conversaciones resulten imposibles de interpretar (siempre suena como si se hablara en una lengua extranjera), pero los efectos vocales, las risas, el ruido de los grandes grupos y los ruidos por el paso de personas (por ejemplo, los avisos de los ascensores, la gente que abre puertas, etcétera) se transmiten casi intactos.¹⁰⁹ Ejecutar DoppelLab con un audio espacializado de este tipo otorga al usuario la sensación de ser un fantasma, anclado a la realidad de un modo vago y tentador, con la impresión y las sensaciones de estar allí, pero





Renders de Don Derek Haddad del paisaje virtual de Tidmarsh hechos con la aplicación DoppelMarsh, que muestra datos de sensores en tiempo real a modo de texto superpuesto, densidades de lluvia y niebla virtuales que replican la sensación atmosférica (arriba a la derecha), un animal virtual «alimentándose» de datos generados por sensores para ilustrar visualmente el historial del entorno (arriba a la izquierda) y un nodo sensor que sube datos al atardecer (abajo)

ajeno a sus detalles. Como niño criado a finales de la década de 1960, en tiempos de McLuhan, este concepto me fascinaba, de manera que, siendo escolar ya conecté una serie de micrófonos situados a cientos de metros de distancia de los mezcladores y amplificadores de mi cuarto. Por aquel tiempo, a pesar de la gran influencia de las películas de espías entonces de moda, no tenía ninguna intención de fisgar en los asuntos de los demás. Sencillamente me fascinaba la idea de generalizar la presencia e integrar el sonido exterior remoto en mezclas estéreo dinámicas de ambiente que más tarde escucharía durante horas y horas. DoppelLab y el entorno DoppelMarsh descrito a continuación han elevado este concepto a un nivel que nunca habría podido concebir en mi analógica juventud.

Teníamos planeado hacer evolucionar DoppelLab por muchos caminos tangenciales; por ejemplo, por la vía de la interacción bidireccional que permite a los visitantes virtuales manifestarse también en nuestro espacio real de diferentes maneras mediante pantallas y actuadores distribuidos. Sin embargo, en su mayor parte, nuestros actuales esfuerzos en esta línea de investigación se han desplazado al exterior, a una ciénaga sin uso de unas 240 hectáreas antes dedicadas a los arándanos, llamada Tidmarsh y situada en Plymouth, Massachusetts, una hora al sur del MIT.¹⁰ Se está restaurando este terreno para recuperar su estado natural como humedal y, para documentar el proceso, hemos instalado centenares de sensores inalámbricos que miden una serie de parámetros, como la humedad, la temperatura, la conductividad y la humedad del suelo, los movimientos cercanos, la calidad atmosférica y del agua, el viento, el sonido, la calidad de la luz, etcétera. Con nuestro protocolo inalámbrico de baja potencia derivado de ZigBee y cargando la información en CHAIN, estos sensores, diseñados por mi pupilo Brian Mayton, tienen una duración de dos años con pilas AA (enviando datos cada 20 segundos) o infinita cuando se alimentan mediante una pequeña célula solar. También contamos con 30 fuentes de audio en tiempo real a partir de una serie de micrófonos distribuidos por Tidmarsh, con los cuales estamos explorando nuevas aplicaciones de audio espacializado, reconocimiento de animales salvajes en tiempo real mediante aprendizaje profundo,¹¹ etcétera.

Además de emplear este rico y denso archivo de datos para analizar el progreso de la recuperación del paraje en colaboración con científicos ecólogos, también usamos el flujo de datos en tiempo real colgados en CHAIN para crear una visualización valiéndonos del motor de un juego. En el marco de este DoppelMarsh, un usuario puede flotar a través de un paisaje virtual resintetizado (actualizado automáticamente mediante la información recogida por las cámaras, de modo que la apariencia virtual se adapte a los cambios estacionales y climáticos del mundo real) y ver la información de los sensores encarnada en gráficos, animaciones y música relativos a la ubicación. Los sonidos de DoppelMarsh proceden tanto de los micrófonos instalados (configurados en el espacio de acuerdo con la posición virtual del usuario) como de la música generada por los datos de los sensores (por ejemplo, los dispositivos cercanos nos comunican con voz la temperatura, la humedad, la actividad, etcétera). Hemos desarrollado un sistema para componer música sobre los datos de Tidmarsh¹² y, hasta ahora, hemos organizado cuatro mapeos musicales, que pronto serán más.

Mediante nuestro Tidmarsh virtual hemos creado una nueva vía para sentir a distancia el paisaje real sin renunciar a parte de la estética real. En DoppelMarsh se puede flotar por terreno pantanoso que hasta ahora era muy difícil de transitar (y sin sufrir las picaduras de insectos, antes aseguradas), oyendo lo que captan los micrófonos cercanos y viendo



animaciones metafóricas procedentes de sensores en tiempo real (incluida la flora y la fauna que proporcionan datos a determinados sensores, de manera que su apariencia y comportamiento reflejan el historial de temperatura, humedad, etcétera, en esa área). Asimismo, estamos desarrollando una «prótesis sensorial» para aumentar la experiencia de visitantes a la finca Tidmarsh. Gracias al desarrollo de HearThere,¹¹³ un sistema de auriculares que detecta la posición/orientación por conducción ósea, estimaremos dónde o sobre qué están centrando su atención los usuarios, gracias a un abanico de sensores ponibles, y amplificaremos de un modo apropiado el sonido de los micrófonos o sensores relacionados o cercanos. Cuando miran hacia la orilla opuesta de un riachuelo, por ejemplo, los usuarios pueden oír el audio de los micrófonos y sensores situados en la otra orilla, pero si vuelven la vista hacia el agua oirán el sonido de los hidrófonos y sensores sumergidos en ella; es más, si centran la vista en un tronco equipado con acelerómetros sensibles, podrán incluso oír cómo los insectos agujerean su interior. En el futuro, todas las interfaces de usuario utilizarán así la atención: la información pertinente se nos presentará del modo más adecuado y se basará en nuestro foco de atención para mejorar la percepción y no distraernos.

Creo que los artistas están desempeñando un papel crucial a la hora de determinar cómo se nos presenta el mundo aumentado. En la actualidad podemos disponer, en cualquier parte, de grandes fuentes de datos procedentes de la vida cotidiana, y cada vez es más fácil obtener las herramientas para darles una estructura. En semejante contexto, artistas, compositores y diseñadores esculpirán los entornos y las realizaciones que nos brindan esta información para crear una obra relevante para el ser humano. De hecho, un *mantra* habitual ahora en mi grupo de investigación es que «el *big data* (obtención y análisis de datos masivos) es el lienzo para los artistas del futuro», cosa que hemos ilustrado mediante los marcos de creación musical disponibles tanto con los datos de DoppelMarsh¹¹⁴ como con los datos físicos en tiempo real procedentes del detector ATLAS del Gran Colisionador de Hadrones del CERN.¹¹⁵ Vislumbro un futuro cercano en el que un compositor pueda crear una pieza a partir de una ciudad inteligente, cuyo tráfico, meteorología, calidad del aire, flujo de peatones, etcétera, se traduzcan en una música que cambie en función de las condiciones y la ubicación de su usuario virtual. Se trata de constructos creativos interminables, siempre cambiantes y que se pueden percibir como algo relacionado con elementos reales que existen en lugares reales, lo que les otorga inmediatez e importancia.

CONCLUSIONES

Durante la última década, la ley de Moore ha democratizado en enorme medida la tecnología de los sensores. El presente capítulo ha abordado algunos de los muchísimos modos de detectar a los humanos y sus actividades.¹¹⁶ Cada vez son más numerosos los sensores integrados en productos de uso corriente (basta con ver los teléfonos móviles, que se han convertido en las navajas suizas del mundo del sensor y la radiofrecuencia) y el movimiento DIY también ha permitido que los módulos de sensores personalizados sean fáciles de fabricar o comprar a partir de muchos puntos de venta en línea o colaborativos.¹¹⁷ En consecuencia, esta década ha sido testigo de un ingente incremento de datos diversos que afluyen a la red. Sin duda, esta tendencia continuará en los años futuros y nos planteará el gran reto de sintetizar dicha información por



muchas vías, como los grandes motores de contexto basados en la nube, los sensores virtuales y el aumento artificial de la percepción humana. Estos avances no solo prometen abrir la puerta a una verdadera computación ubicua, sino que también apuntan a una redefinición radical de cómo sentimos la realidad y que hará que la actual división de nuestra atención entre los teléfonos móviles y el mundo real parezca pintoresca y arcaica.

Entramos en un mundo en el cual la información de sensores ubicuos del espacio que nos rodea se propagará por varios niveles de lo que hoy denominamos «la nube», para después proyectarse sobre nuestro entorno físico y lógico a modo de información contextual que guiará los procesos y las aplicaciones que se manifiesten a nuestro alrededor. No nos sacaremos los teléfonos del bolsillo para desviar nuestra atención hacia una interfaz de usuario táctil, más bien encontraremos la información distribuida entre dispositivos que llevaremos puestos y pantallas de ambiente de nuestro alrededor. Los ordenadores se convertirán antes en un compañero que en la experiencia derivada de ejecutar una aplicación. En sus escritos de hace décadas, mi colega Nicholas Negroponte, fundador y director del Media Lab, describió esta relación como la de un «mayordomo electrónico».¹¹⁸ A día de hoy, la veo como una prolongación de nosotros mismos y no como la encarnación de un «otro». Nuestra relación con la computación será mucho más íntima a medida que se materialice el reinado de los dispositivos ponibles. En estos momentos, toda la información está a nuestro alcance en dispositivos que nos rodean, basta el toque de un dedo o pronunciar una frase. Pronto llegará directa a nuestros ojos y oídos cuando entremos en la era de los dispositivos ponibles (algo que ya previeron a mediados de la década de 1990 los entonces estudiantes del Media Lab Steve Mann¹¹⁹ y Thad Starner,¹²⁰ que vivían en una versión anticipada de este mundo). Esta información estará regida por el contexto y la atención, no por la petición directa, y en gran medida será precognitiva, al presentarse antes de que formulemos preguntas directas. De hecho, en este futuro las fronteras del individuo serán muy difusas. Los humanos hemos ido forzando estos límites desde los albores de la sociedad. Primero compartíamos información mediante la historia oral, luego nuestros horizontes mentales se ampliaron con la escritura y, después, con la imprenta, que eliminaba la necesidad de retener de memoria la información textual y nos permitía, en su lugar, recurrir a señales para navegar por archivos más grandes. En el futuro, cuando vivamos y aprendamos en un mundo profundamente surcado por redes de dispositivos ponibles y, en última instancia, implantables, la manera en que nuestra esencia e individualidad se repartirá entre las neuronas orgánicas y aquello en lo que se haya convertido el ecosistema de información planteará una frontera fascinante que promete redefinir la humanidad.

AGRADECIMIENTOS



El trabajo del MIT Media Lab que se describe en el presente capítulo ha sido obra de mis estudiantes de doctorado, investigadores posdoctorales y colaboradores visitantes a lo largo de la última década. Muchos han sido citados por su nombre de un modo explícito en este texto y otros figuran en los artículos y tesis mencionados. Animo al lector a consultar las referencias facilitadas para acceder a más información sobre estos proyectos, acompañada de una explicación más concienzuda del trabajo relacionado. Mi agradecimiento a los patrocinadores del MIT Media Lab por su apoyo a estos esfuerzos.



NOTAS

1. Bush, V., «As We May Think», en *Atlantic Monthly*, n.º 176, julio de 1945, pp. 101-108.
2. Weiser, M., «The Computer for the 21st Century», en *Scientific American*, vol. 265, n.º 3, septiembre de 1991, pp. 66-75.
3. Paradiso, J. A., «Modular Synthesizer», en Stocker, G. y Schopf, C. (eds.), *Timeshift* (Actas de Ars Electronica, 2004), Ostfildern-Ruit, Alemania, Hatje Cantz Verlag, 2004, pp. 364-370.
4. Paradiso, J. A., «Electronic Music Interfaces: New Ways to Play», en *IEEE Spectrum*, vol. 34, n.º 12, diciembre de 1997, pp. 18-30.
5. Paradiso, J. A., «Sensor Architectures for Interactive Environments», en Deleaney, K. (ed.), *Augmented Materials & Smart Objects: Building Ambient Intelligence Through Microsystems Technologies*, cap. 16, Springer, 2008, pp. 345-362.
6. MacKenzie, D., *Inventing Accuracy: a Historical Sociology of Nuclear Missile Guidance*, Cambridge, Massachusetts, The MIT Press, 1990.
7. Walter, P. L., «The History of the Accelerometer» (ed. rev.), en *Sound and Vibration*, enero de 2007, pp. 84-92.
8. Weinberg, H., «Using the ADXL202 in Pedometer and Personal Navigation Applications», en *Analog Devices Application Note AN-602*, Analog Devices Inc., 2002.
9. Renaudin, V., Yalak, O. y Tomé, P., «Hybridization of MEMS and Assisted GPS for Pedestrian Navigation», en *Inside GNSS*, enero-febrero de 2007, pp. 34-42.
10. Malinowski, M., Moskwa, M., Feldmeier, M., Laibowitz, M. y Paradiso, J. A., «CargoNet: A Low-Cost MicroPower Sensor Node Exploiting Quasi-Passive Wakeup for Adaptive Asynchronous Monitoring of Exceptional Events», en *Proceedings of the 5th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'07)*, Sidney, Australia, 6-9 de noviembre de 2007, pp. 145-159.
11. Benbasat, A. Y. y Paradiso, J. A., «A Framework for the Automated Generation of Power-Efficient Classifiers for Embedded Sensor Nodes», en *Proceedings of the 5th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'07)*, Sidney, Australia, 6-9 de noviembre de 2007, pp. 219-232.
12. Bernstein, J., «An Overview of MEMS Inertial Sensing Technology», en *Sensors Magazine*, 1 de febrero de 2003.
13. Benbasat, A. Y. y Paradiso, J. A., op. cit., pp. 219-232.
14. Ahmad, N., Ghazilla, A. R., Khain, N. M. y Kasi, V., «Reviews on Various Inertial Measurement (IMU) Sensor Applications», en *International Journal of Signal Processing Systems*, vol. 1, n.º 2, diciembre de 2013, pp. 256-262.
15. Verplaetse, C., «Inertial Proprioceptive Devices: Self-motion-Sensing Toys and Tools», en *IBM Systems Journal*, vol. 35, n.º 3-4, 1996, pp. 639-650.
16. Paradiso, J. A., «Some Novel Applications for Wireless Inertial Sensors», en *Proceedings of NSTI Nanotech 2006*, vol. 3, Boston, Massachusetts, 7-11 de mayo de 2006, pp. 431-434.
17. Aylward, R. y Paradiso, J. A., «A Compact, High-Speed, Wearable Sensor Network for Biomotion Capture and Interactive Media», en *Proceedings of the Sixth International IEEE/ACM Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN 07)*, Cambridge, Massachusetts, 25-27 de abril de 2007, pp. 380-389.
18. Lapinski, M., Feldmeier, M. y Paradiso, J. A., «Wearable Wireless Sensing for Sports and Ubiquitous Interactivity», en *IEEE Sensors 2011*, Dublín, Irlanda, 28-31 de octubre de 2011.
19. Lapinski, M. T., «A Platform for High-Speed Biomechanical Data Analysis using Wearable Wireless Sensors», tesis doctoral, MIT Media Lab, agosto de 2013.
20. Lightman, K., «Silicon Gets Sporty: Next-Gen Sensors Make Golf Clubs, Tennis Rackets, and Baseball Bats Smarter Than Ever», en *IEEE Spectrum*, marzo de 2016, pp. 44-49.
21. Para un ejemplo temprano, véase la ficha técnica del Analog Devices AD22365.
22. M. Feldmeier y Paradiso, J. A., «Personalized HVAC Control System», en *Proceedings of Internet of Things 2010*, Tokio, Japón, del 26 de noviembre al 1 de diciembre de 2010.
23. De Rossi, D. y Lymberis, A. (eds.), «IEEE Transactions on Information Technology», en *Biomedicine, Special Section on New Generation of Smart Wearable Health Systems and Applications*, vol. 9, n.º 3, septiembre de 2005.
24. Buechley, L., «Material Computing: Integrating Technology into the Material World», en Price, S., Jewitt, C. y Brown, B. (eds.), *The SAGE Handbook of Digital Technology Research*, Sage Publications Ltd., 2013.
25. Poupayev, I. Gong, N.-W., S., Fukuhara, M. E., Karagozler, Schwesig, C. y Robinson, K., «Project Jacquard: Interactive Digital Textiles at Scale», en *Proceedings of CHI 2016*, 7-12 de mayo de 2016, pp. 4.216-4.227.
26. Vinge, V., *Rainbow's End*, Nueva York, Tor Books, 2006.
27. Hou, C., Jia, X., Wei, L., Tan, S.-C., Zhao, X., Joanopoulos, J. D. y Fink, Y., «Crystalline Silicon Core Fibres from Aluminium Core Performers», en *Nature Communications*, vol. 6, febrero de 2015.
28. Chandler, D. L., «New Institute Will Accelerate Innovations in Fibers and Fabrics», en *MIT News*, 1 de abril de 2016.
29. Vega, K., *Beauty Technology: Designing Seamless Interfaces for Wearable Computing*, Cham, Suiza, Springer, 2016.
30. Liu, X., Vega, K., Maes, P. y Paradiso, J. A., «Wearability Factors for Skin Interfaces», en *Proceedings of the 7th Augmented Human International Conference 2016 (AH '16)*, Nueva York, ACM, 25-27 de febrero de 2016.
31. Vega, K., Jing, N., Yetisen, A., Kao, V., Barry, N. y Paradiso, J. A., «The Dermal Abyss: Interfacing with the Skin by Tattooing Biosensors», documento de trabajo para la conferencia TEI 2017.



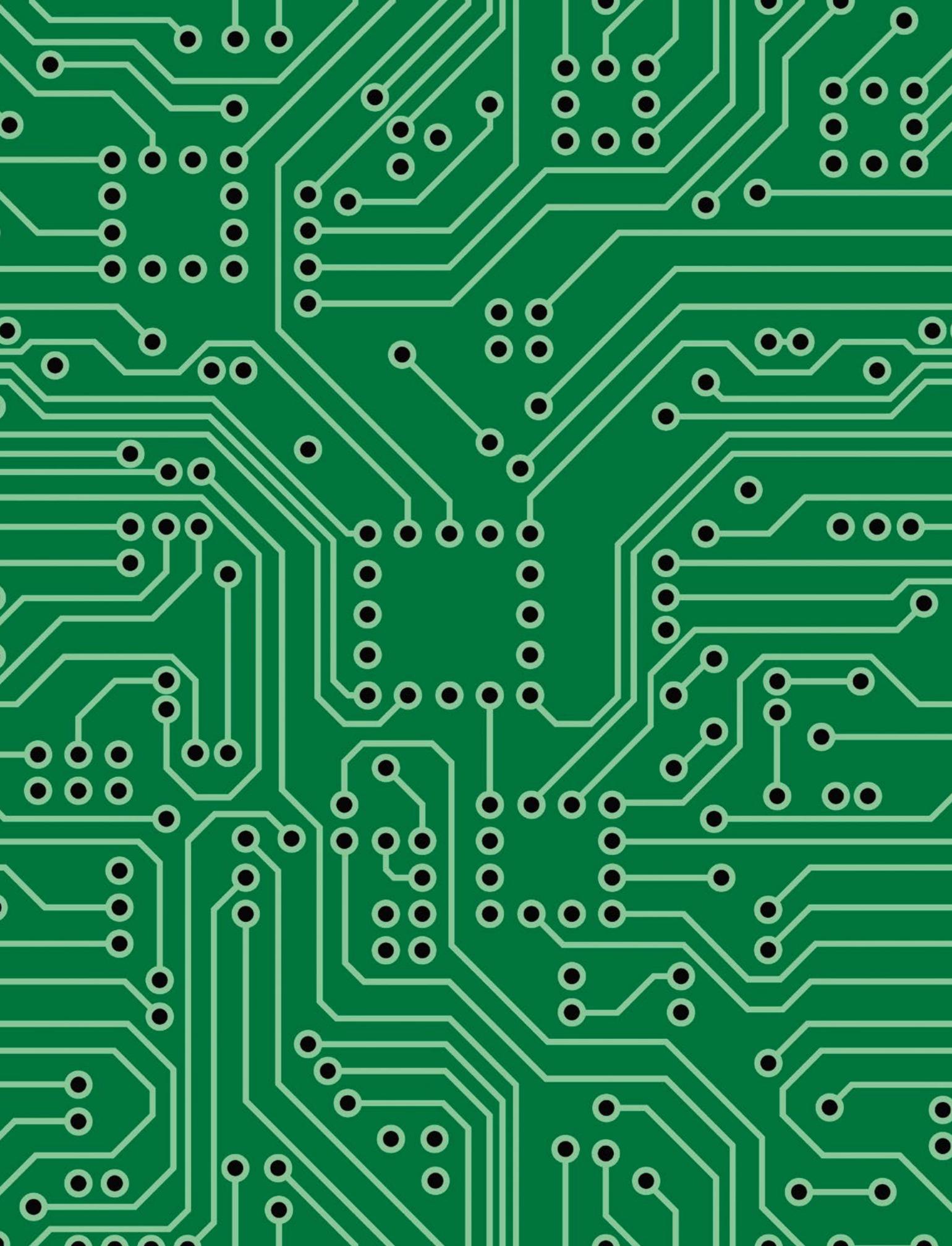
32. Mayton, B. D., Zhao, N., Aldrich, M., Gillian, N. y Paradiso, J. A., «WristQue: A Personal Sensor Wristband», en *Proceedings of the IEEE International Conference on Wearable and Implantable Body Sensor Networks (BSN'13)*, 2013, pp. 1-6.
33. Bainbridge, R. y Paradiso, J. A., «Wireless Hand Gesture Capture Through Wearable Passive Tag Sensing», en *International Conference on Body Sensor Networks (BSN'11)*, Dallas, Texas, 23-25 de mayo de 2011, pp. 200-204.
34. Way, D. y Paradiso, J. A., «A Usability User Study Concerning Free-Hand Microgesture and Wrist-Worn Sensors», en *Proceedings of the 2014 11th International Conference on Wearable and Implantable Body Sensor Networks (BSN '14)*, IEEE Computer Society, junio de 2104, pp. 138-142.
35. Dementyev, A. y Paradiso, J. A., «WristFlex: Low-Power Gesture Input with Wrist-Worn Pressure Sensors», en *Proceedings of UIST 2014, the 27th annual ACM symposium on User interface software and technology*, Honolulu, Hawái, octubre de 2014, pp. 161-166.
36. Kao, H.-L., Dementyev, A., Paradiso, J. A. y Schmandt, C., «NailIO: Fingernails as Input Surfaces», pendiente de publicación en las Actas de la International Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'15), Seúl, Corea del Sur, abril de 2015.
37. Laibowitz, M. y Paradiso, J. A., «Parasitic Mobility for Pervasive Sensor Networks», en Gellersen, H. W., Want R. y Schmidt A. (eds.), *Pervasive Computing, Proceedings of the Third International Conference, Pervasive 2005*, Múnich, Alemania, mayo de 2005, Berlín, Springer-Verlag, 2005, pp. 255-278.
38. Dementyev, A., Kao C.-L., Choi, I., Ajilo, D., Xu, M., Paradiso, J. A., Schmandt, C. y Follmer, S., «Rovables: Miniature On-Body Robots as Mobile Wearables», en *Proceedings of ACM UIST 2016*, 2016.
39. Orwell, G., 1984, Londres, Secker and Warburg, 8 de junio de 1949.
40. Fossum, E. R., «CMOS Image Sensors: Electronic Camera-On-A-Chip», en *IEEE Transactions On Electron Devices*, vol. 44, n.º 10, octubre de 1997, pp. 1.689-1.698.
41. Paradiso, J. A., «New Technologies for Monitoring the Precision Alignment of Large Detector Systems», en *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, vol. A386, 1997, pp. 409-420.
42. Gokturk, S. B., Yalcin, H. y Bamji, C., «A Time-Of-Flight Depth Sensor-System Description, Issues and Solutions», en *Proceedings of the 2004 Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshop (CVPRW'04)*, vol. 3, 2004, pp. 35-45.
43. Velten, A., Wilwacher, T., Gupta, O., Veeraraghavan, A., Bawendi, M. G. y Raskar, R., «Recovering Three-Dimensional Shape around a Corner using Ultra-Fast Time-of-Flight Imaging», en *Nature Communications*, vol. 3, 2012.
44. Lifton, J., Laibowitz, M., Harry, D., Gong, N. W., Mittal, M. y Paradiso, J. A., «Metaphor and Manifestation - Cross Reality with Ubiquitous Sensor/Actuator Networks», en *IEEE Pervasive Computing Magazine*, vol. 8, n.º 3, julio-septiembre de 2009, pp. 24-33.
45. Laibowitz, M., Gong, N.-W. y Paradiso, J. A., «Multimedia Content Creation using Societal-Scale Ubiquitous Camera Networks and Human-Centric Wearable Sensing», en *Proceedings of ACM Multimedia 2010*, Florencia, Italia, 25-29 de octubre de 2010, pp. 571-580.
46. Paradiso, J. A., Gips, J., Laibowitz, M., Sadi, S., Merrill, D., Aylward, R., Maes, P. y Pentland, A., «Identifying and Facilitating Social Interaction with a Wearable Wireless Sensor Network», en *Springer Journal of Personal & Ubiquitous Computing*, vol. 14, n.º 2, febrero de 2010, pp. 137-152.
47. Laibowitz, M., Gong, N.-W. y Paradiso, J. A., *op. cit.*, pp. 571-580.
48. Reben, A. y Paradiso, J. A., «A Mobile Interactive Robot for Gathering Structured Social Video», en *Proceedings of ACM Multimedia 2011*, octubre de 2011, pp. 917-920.
49. Gillian, N., Pfenninger, S., Russell, S. y Paradiso, J. A., «Gestures Everywhere: A Multimodal Sensor Fusion and Analysis Framework for Pervasive Displays», en *Proceedings of The International Symposium on Pervasive Displays (PerDis '14)*, Sven Gehring (ed.), Nueva York, ACM, junio de 2014, pp. 98-103.
50. Bletsas, M., «The MIT Media Lab's Glass Infrastructure: An Interactive Information System», en *IEEE Pervasive Computing*, febrero de 2012, pp. 46-49.
51. Greenberg, S., Marquardt, N., Ballendat, T., Diaz-Marino, R. y Wang, M., «Proxemic interactions: the new ubicomp?», en *ACM Interactions*, vol. 18, n.º 1, enero de 2011, pp. 42-50.
52. Gong, N.-W., Laibowitz, M. y Paradiso, J. A., «Dynamic Privacy Management in Pervasive Sensor Networks», en *Proceedings of Ambient Intelligence (AmI) 2010*, Málaga, España, 25-29 de octubre de 2010, pp. 96-106.
53. Dublon, G., «Beyond the Lens: Communicating Context through Sensing, Video, and Visualization», tesis de máster, MIT Media Lab, septiembre de 2011.
54. Mayton, B. D., Dublon, G., Palacios, S. y Paradiso, J. A., «TRUSS: Tracking Risk with Ubiquitous Smart Sensing», en *IEEE SENSORS 2012*, Taipéi, Taiwán, octubre de 2012.
55. Sinha, A. y Chandrakasan, A., «Dynamic Power Management in Wireless Sensor Networks», en *IEEE Design & Test of Computers*, marzo-abril de 2001, pp. 62-74.
56. Paradiso, J. A. y Starner, T., «Energy Scavenging for Mobile and Wireless Electronics», en *IEEE Pervasive Computing*, vol. 4, n.º 1, febrero de 2005, pp. 18-27.
57. Boyle, E., Kiziroglou, M., Mitcheson, P. y Yeatman, E., «Energy Provision and Storage for Pervasive Computing», en *IEEE Pervasive Computing*, octubre-diciembre de 2016.
58. Mitcheson, P. D., Green, T. C., Yeatman E. M. y Holmes, A. S., «Architectures for Vibration-Driven Micropower Generators», en *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 13, n.º 3, junio de 2004, pp. 429-440.
59. Ramadass, Y. K. y Chandrakasan, A. P., «A Batteryless Thermoelectric Energy-Harvesting Interface Circuit with 35mV Startup Voltage», en *Proceedings of ISSCC 2010*, 2010, pp. 486-488.
60. Nishimoto, H., Kawahara, Y. y Asami, T., «Prototype Implementation of Wireless Sensor Network Using TV Broadcast RF Energy Harvesting», en *UbiComp'10*, 26-29 de septiembre de 2010, Copenhague, Dinamarca, pp. 373-374.



61. Smith, J. R., Sample, A., Powledge, P., Mamishev, A. y Roy, S., «A Wirelessly Powered Platform for Sensing and Computation», en *UbiComp 2006: Eighth International Conference on Ubiquitous Computing*, Orange County, California, 17-21 de septiembre de 2006, pp. 495-506.
62. Bainbridge, R. y Paradiso, J. A., «Wireless Hand Gesture Capture Through Wearable Passive Tag Sensing», en *Proceedings of BSN2011*, Dallas, Texas, 23-25 de mayo de 2011, pp. 200-204.
63. Park, R. L., *Voodoo Science: The Road from Foolishness to Fraud*, Oxford, Oxford University Press, 2001.
64. Warneke, B., Last, M., Liebowitz, B. y Pister, K. S. J., «Smart Dust: Communicating With a Cubic-Millimeter Computer», en *IEEE Computer*, vol. 34, n.º 1, enero de 2001, pp. 44-51.
65. Lee, Y., «Ultra-Low Power Circuit Design for Cubic-Millimeter Wireless Sensor Platform», tesis doctoral, University of Michigan (Departamento de Ingeniería Eléctrica), 2012.
66. Overbyte, D., «Reaching for the Stars, Across 4.37 Light-Years», en *New York Times*, 12 de abril de 2016.
67. Véase, por ejemplo, Richard, M. G., «Japan: Producing Electricity from Train Station Ticket Gates», 4 de agosto de 2006. http://www.treehugger.com/files/2006/08/japan-ticket_gates.php
68. Mozer, M., «The Neural Network House: An Environment that Adapts to Its Inhabitants», en *Proceedings of the American Association for Artificial Intelligence Spring Symposium on Intelligent Environments*, Menlo Park, California, 1998, pp. 110-114.
69. Paradiso, J. A., Dutta, P., Gellerson, H. y Schooler, E. (eds.), «Special Issue on Smart Energy Systems», en *IEEE Pervasive Computing Magazine*, vol. 10, n.º 1, enero-marzo de 2011.
70. Feldmeier, M. y Paradiso, J. A., «Personalized HVAC Control System», en *Proceedings of Internet of Things 2010*, Tokio, Japón, del 26 de noviembre al 1 de diciembre de 2010.
71. *Ibid.*
72. Chabanis, G., «Self-Powered Wireless Sensors in Buildings: an Ideal Solution for Improving Energy Efficiency while Ensuring Comfort to Occupant», en *Proceedings Of Energy Harvesting & Storage Europe 2011*, IDTechEx, 21 y 22 de junio de 2011.
73. Aldrich, M., Zhao, N. y Paradiso, J. A., «Energy Efficient Control of Polychromatic Solid-State Lighting Using a Sensor Network», en *Proceedings SPIE (OP10) 7784*, San Diego, California, 1-5 de agosto de 2010.
74. Aldrich, M., «Experiential Lighting—Development and Validation of Perception-based Lighting Controls», tesis doctoral, MIT Media Lab, agosto de 2014.
75. Zhao, N., Aldrich, M., Reinhart, C. F. y Paradiso, J. A., «A Multidimensional Continuous Contextual Lighting Control System Using Google Glass», documento elaborado para su presentación en la conferencia *2nd ACM International Conference on Embedded Systems for Energy-Efficient Built Environments (BuildSys 2015)*, noviembre de 2015.
76. Axaria, A., «INTELLIGENT AMBIANCE: Digitally Mediated Workspace Atmosphere, Augmenting Experiences and Supporting Wellbeing», tesis de máster, MIT Media Lab, agosto de 2016.
77. Levis, P., Madden, S., Polastre, J., Szewczyk, R., Whitehouse, K., Woo, A., Gay, D., Hill, J., Welsh, M., Brewer, E. y Culler, D., «TinyOS: An Operating System for Sensor Networks», en *Ambient Intelligence*, Berlín, Springer, 2005, pp. 115-148.
78. Gakstatter, E., «Finally, a List of Public RTK Base Stations in the U.S.», en *GPS World*, 7 de enero de 2014.
79. Véase <https://www.microsoft.com/en-us/research/event/microsoft-indoor-localization-competition-ipsn-2016/>
80. Elnahrawy, E., Li, X. y Martin, R., «The Limits of Localization Using Signal Strength: A Comparative Study», en *Proceedings of the 1st IEEE International Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks*, Santa Clara, California, octubre de 2004.
81. Maróti, M., Kusy, B., Balong, G., Völgyesi, P., Nadás, A., Molnár, K., Dóra, S. y Lédeczi, A., «Radio Interferometric Geolocation», en *Proceedings of ACM SENSYS 2005*, noviembre de 2005, pp. 1-12.
82. Belloni, F., Ranki, V., Kainulainen, A. y Richter, A., «Angle-based Indoor Positioning System for Open Indoor Environments», en *Proceedings of WPNC*, 2009.
83. Greenberg, S., Marquardt, N., Ballendat, T., Díaz-Marino, R. y Wang, M., *op. cit.*, pp. 42-50.
84. Mayton, B. D., Zhao, N., Aldrich, M., Gillian, N. y Paradiso, J. A., «WristQue: A Personal Sensor Wristband», en *Proceedings of the IEEE International Conference on Wearable and Implantable Body Sensor Networks (BSN'13)*, 2013, pp. 1-6.
85. Bolt, R., «“Put-that-there”: Voice and Gesture at the Graphics Interface», en *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, vol. 14, n.º 3, julio de 1980, pp. 262-270.
86. Froehlich, J., Larson, E., Gupta, S., Cohn, G., Reynolds, M. y Patel, S., «Disaggregated End-Use Energy Sensing for the Smart Grid», en *IEEE Pervasive Computing*, enero-marzo de 2010, pp. 28-39.
87. Cohn, G., Morris, D., Patel, S. y Tan, D. S., «Your Noise is My Command: Sensing Gestures Using the Body as an Antenna», en *Proceedings of CHI 2011*, 7-12 de mayo de 2011, pp. 791-800.
88. Gupta, S., Chen, K.-Y., Reynolds, M. S. y Patel, S., «LightWave: Using Compact Fluorescent Lights as Sensors», en *Proceedings of UbiComp'11*, 2011, pp. 65-70.
89. Chung, J., Donahoe, M., Schmandt, C., Kim, I.-J., Razavai, P. y Wiseman, M., «Indoor Location Sensing Using Geo-Magnetism», en *Proceedings of MobiSys'11*, del 28 de junio al 1 de julio de 2011, Bethesda, Maryland, pp. 141-154.
90. Zhao, N., Dublon, G., Gillian, N., Dementyev, A. y Paradiso, J. A., «EMI Spy: Harnessing Electromagnetic Interference for Low-Cost, Rapid Prototyping of Proxemic Interaction», documento presentado en la *International Conference on Wearable and Implantable Body Sensor Networks (BSN '15)*, junio de 2015.
91. Gong, N.-W., Hodges, S. y Paradiso, J. A., «Leveraging Conductive Inkjet Technology to Build a Scalable and Versatile Surface for Ubiquitous Sensing», en *Proceedings of UbiComp'11*, 2011, pp. 45-54.
92. Paradiso, J. A., Lifton, J. y Broxton, M., «Sense Media—Multimodal Electronic Skins as Dense Sensor Networks», en *BT Technology Journal*, vol. 22, n.º 4, octubre de 2004, pp. 32-44.



93. Demytyev, A., Kao, H.-L. y Paradiso, J. A., «SensorTape: Modular and Programmable 3D-Aware Dense Sensor Network on a Tape», en *Proceedings of ACM UIST*, 2015.
94. Gong, N.-W., Wang, C.-Y. y Paradiso, J. A., «Low-cost Sensor Tape for Environmental Sensing Based on Roll-to-roll Manufacturing Process», en *IEEE SENSORS 2012*, Taipéi, Taiwán, octubre de 2012.
95. Qi, J., Hong A. y Paradiso J. A., «Crafting Technology with Circuit Stickers», en *Proceedings of the 14th International Conference/ Interaction Design and Children (IDC '15)*, 2015, pp. 438-441.
96. <https://www.xively.com/xively-iot-platform/connected-product-management>
97. <https://allseenalliance.org/framework>
98. <https://www.iotivity.org/>
99. Russell, S. y Paradiso, J. A., «Hypermedia APIs for Sensor Data: A Pragmatic Approach to the Web of Things», en *Proceedings of ACM Mobiquitous 2014*, Londres, Reino Unido, diciembre de 2014, pp. 30-39.
100. <https://github.com/ResEnv/chain-api>
101. Ramsay, D., «LearnAir: toward Intelligent, Personal Air Quality Monitoring», tesis de máster, MIT Media Lab, agosto de 2016.
102. Mittal, M. y Paradiso, J. A., «Ubicorder: A Mobile Device for Situated Interactions with Sensor Networks», en *IEEE Sensors Journal*, vol. 11, n.º 3, *Special issue on Cognitive Sensor Networks*, 2011, pp. 818-828.
103. McLuhan, M., *Understanding Media: The Extensions of Man*, Nueva York, McGraw-Hill, 1964.
104. Lifton, J., Laibowitz, M., Harry, D., Gong, N. W., Mittal, M. y Paradiso, J. A., «Metaphor and Manifestation—Cross Reality with Ubiquitous Sensor/ Actuator Networks», en *IEEE Pervasive Computing Magazine*, vol. 8, n.º 3, julio-septiembre de 2009, pp. 24-33.
105. Véase, por ejemplo, Marquardt, N., Gross, T., Carpendale, S. y Greenberg, S., «Revealing the Invisible: Visualizing the Location and Event Flow of Distributed Physical Devices», en *Proceedings of the Fourth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction (TEI'10)*, 2010, pp. 41-48.
106. Lifton, J. y Paradiso, J. A., «Dual Reality: Merging the Real and Virtual», en *Proceedings of the First International ICST Conference on Facets of Virtual Environments (FaVE)*, LNICST, vol. 33, Berlín, Alemania, Springer, 27-29 de julio de 2009, pp. 12-28.
107. Dublon, G., Pardue, L. S., Mayton, B. D., Swartz, N., Joliat, N., Hurst, P. y Paradiso, J. A., «DoppelLab: Tools for Exploring and Harnessing Multimodal Sensor Network Data», en *Proceedings of IEEE Sensors 2011*, Limerick, Irlanda, octubre de 2011.
108. Dublon, G. y Paradiso, J. A., «How a Sensor-Filled World Will Change Human Consciousness», en *Scientific American*, julio de 2014, pp. 36-41.
109. Joliat, N., Mayton, B. D. y Paradiso, J. A., «Spatialized Anonymous Audio for Browsing Sensor Networks Via Virtual Worlds», en *The 19th International Conference on Auditory Display (ICAD)* (actas de la conferencia), Lodz, Polonia, julio de 2013, pp. 67-75.
110. <http://tidmarsh.media.mit.edu>
111. Duhart, C., «Ambient Sound Recognition» (cap. 8), en *Toward Organic Ambient Intelligences—EMMA*, tesis doctoral, Université du Havre, Francia, junio de 2016.
112. Lynch, E. y Paradiso, J. A., «SensorChimes: Musical Mapping for Sensor Networks», en *Proceedings of the NIME 2016 Conference*, Brisbane, Australia, 11-15 de julio de 2016.
113. Russell, S., Dublon, G. y Paradiso, J. A., «HearThere: Networked Sensory Prosthetics Through Auditory Augmented Reality», en *Proceedings of the ACM Augmented Human Conference*, Ginebra, Suiza, febrero de 2016.
114. Lynch, E. y Paradiso, J. A., *op. cit.*
115. Cherston, J., Hill, E., Goldfarb, S. y Paradiso, J. A., «Musician and Mega-Machine: Compositions Driven by Real-Time Particle Collision Data from the ATLAS Detector», en *Proceedings of the NIME 2016 Conference*, Brisbane, Australia, 11-15 de julio de 2016.
116. Teixeira, T., Dublon, G. y Savvides, A., «A Survey of Human-Sensing: Methods for Detecting Presence, Count, Location, Track, and Identity», en *ACM Computing Surveys*, vol. 5, n.º 1, 2010, pp. 59-69.
117. Paradiso, J. A., Heidemann, J. y Zimmerman, T. G., «Hacking is Pervasive», en *IEEE Pervasive Computing*, vol. 7, n.º 3, pp. 13-15, julio-septiembre de 2008.
118. Negroponte, N., *Being Digital*, Nueva York, Knopf, 1995.
119. Mann, S., «Wearable Computing: A First Step Toward Personal Imaging», en *IEEE Computer*, febrero de 1997, pp. 25-32.
120. Starner, T., «The Challenges of Wearable Computing, Parts 1 & 2», en *IEEE Micro*, vol. 21, n.º 4, julio de 2001, pp. 44-67.



El futuro de la comunicación humano-máquina: el test de Turing

**KEVIN WARWICK
Y HUMA SHAH**



Kevin Warwick
Coventry University, Coventry, Reino Unido

Kevin Warwick es profesor emérito en las universidades de Reading y Coventry. Sus principales áreas de investigación son la inteligencia artificial, los sistemas biomédicos, la robótica y los ciborgs. Es graduado por la Universidad de Aston y doctor e investigador por el Imperial College de Londres. Ha enseñado en las universidades de Oxford, Newcastle, Warwick, Reading y Coventry. Tiene doctorados científicos del Imperial College y la Czech Academy of Sciences. También doctorados honoríficos de nueve universidades. Ha recibido las medallas IET Mountbatten y la Ellison-Cliffe de la Royal Society of Medicine.

Huma Shah
Coventry University, Coventry, Reino Unido

Huma Shah es investigadora asociada de la School of Computing, Electronics and Mathematics de la Universidad de Coventry, Reino Unido. Es doctora por la Universidad de Reading, Reino Unido, con una tesis doctoral titulada «Deception-detection and machine intelligence in practical Turing tests» (Engaño-decepción e inteligencia de las máquinas en test prácticos de Turing). Es autora o coautora de más de 35 publicaciones revisadas por pares y, con Kevin Warwick, coautora del libro *Turing's Imitation Game: Conversations with the Unknown*, publicado por Cambridge University Press. Es miembro del Alan Turing Centenary Advisory Committee y colaboró activamente en la organización de actos para el centenario del científico en 2012.

El test de Turing, que busca distinguir entre un ser humano y un ordenador a partir de sus respuestas a preguntas abiertas, está considerado el hito por excelencia de la capacidad de comunicación de las máquinas. En este capítulo se explora la naturaleza de las comunicaciones, incluidos comportamientos e interacciones durante test de Turing reales para valorar el estado actual de la cuestión. En concreto, se consideran los efectos de la mentira, el malentendido, el humor y la falta de conocimientos, con ejemplos reales de cada uno. Se examinan casos concretos de máquinas con buen rendimiento y transcripciones realizadas durante el experimento de 2014 de la Royal Society, cuando una máquina superó por primera vez el test.

INTRODUCCIÓN

El juego de imitación de Turing, conocido como test de Turing, se propuso originalmente como alternativa a la cuestión de si se podía afirmar o no que las máquinas piensan. Desde la publicación de dicho trabajo gran parte de la discusión se ha centrado en el concepto de la máquina pensante, si puede en ocasiones parecer humana o incluso si alguna logrará imitar todas las facetas del pensamiento humano (Dennett 1998; Dreyfus y Dreyfus 2009; Minsky 1982; Shah 2010). Turing sugirió: «¿Acaso las máquinas no hacen algo que podría describirse como pensamiento, pero que es muy distinto de lo que hace el hombre?» (Turing 1950). En consecuencia, investigadores de este campo creen que el test sienta las bases de lo que ahora conocemos como inteligencia artificial, incluso hay quienes lo consideran el «objetivo empírico» de la inteligencia artificial (Harnad 1992).

Aquí analizaremos el juego de imitación en sí y su aplicación práctica en la interacción humano-máquina. En el juego, una serie de interrogadores humanos tratan de averiguar la naturaleza de entidades ocultas (humanos y ordenadores) con las que se están comunicando. Siguiendo las indicaciones de Turing (Turing 1950), cada diálogo dura solo cinco minutos, al cabo de los cuales el interrogador deberá hacer una «identificación correcta» y clara de su interlocutor oculto, declarando cuál es humano y cuál máquina.

Al analizar el juego más en profundidad surgen numerosas y fascinantes cuestiones en relación con la comunicación y la conducta de humanos y máquinas. Cuando se examina la capacidad de una máquina de comunicarse con un interrogador humano, inmediatamente tenemos que plantearnos con quién está comunicándose, así como la falibilidad, las





tendencias y los prejuicios de esa persona. También habrá que tener en cuenta importantes factores presentes en la naturaleza humana, como la mentira, el malentendido, la falta de conocimientos y el humor, sin olvidarnos de la estupidez.

En los últimos años se han hecho numerosas sesiones prácticas del test de Turing con la participación de algunas de las mejores «máquinas conversadoras» del mundo. En ellas se trató de ser lo más fiel posible a la descripción del test que nos legó Turing en su influyente publicación de 1950 (Turing 1950). Una de estas sesiones experimentales se llevó a cabo en Bletchley Park, Inglaterra, en 2012. Otra, en la Royal Society de Londres, en 2014. En esta última se batió el récord de test realizados en una única sesión.

En este artículo usamos las transcripciones reales de dichos test como base para estudiar los requisitos para engañar a un interrogador humano y la manera en que recursos como el humor y la mentira pueden afectar a las decisiones de este. Además, analizamos una serie de casos en los que comunicadores humanos han sido identificados inequívocamente como máquinas por los interrogadores y al revés. Por último, ofrecemos al lector la oportunidad de poner a prueba su capacidad de análisis pidiéndole que decida sobre la naturaleza de las entidades ocultas en transcripciones concretas: ¿la entidad oculta es humana o máquina?

Las transcripciones entre jueces y entidades ocultas proceden de test en los que un juez humano mantenía una conversación de cinco minutos con dos entidades ocultas de manera simultánea. Una era humana y la otra era una máquina. La naturaleza de la conversación, así como su duración, dependían en gran medida del juez.

En una de las sesiones, una serie de jueces participaron en cinco test diferentes. En el primero, un ser humano oculto se enfrentaba a una máquina también oculta. Por supuesto, los jueces no sabían quién era quién, solo que había dos entidades ocultas y que debían emitir un veredicto sobre la naturaleza de cada una; aunque se les había informado a priori de que una entidad era humana y la otra entidad era máquina. El segundo test enfrentaba a un humano y una máquina distintos, aunque también ocultos. Así hasta cinco test. Al final de cada uno, los jueces debían decir si la entidad era humana, máquina o si no estaban seguros.

En los test, a los humanos ocultos se les dijo que fueran ellos mismos, humanos, pero que no revelaran ni su identidad ni datos personales. No se les incentivó en absoluto para actuar de un modo concreto ni percibieron honorarios por su participación en el experimento. Esto no impidió que alguno proporcionara información falsa, algo que los seres humanos hacen con frecuencia. Los test consistían en «conversaciones sin restricciones», es decir, que los jueces podían preguntar cualquiera cosa y sacar cualquier tema, siempre respetando las normas básicas de la cortesía (se les informó de que algunas de las entidades humanas podían ser niños).

PRÁCTICAS DEL TEST DE TURING

Las conversaciones aquí presentadas son el resultado de pruebas de cinco minutos de duración sobre la interacción entre un juez humano y una entidad oculta, de acuerdo con la formulación original de Turing (Turing 1950). Sabemos que hay discrepancias sobre la duración indicada y también sobre lo que Turing quería decir realmente (Shah y Warwick 2010a). Pero ese es un tema para otra ocasión y no altera los propósitos de este artículo.



Lo que hacemos es presentar una serie de transcripciones tomadas durante unas jornadas especiales de prácticas del test de Turing que se desarrollaron, bajo condiciones estrictas y ante un público numeroso, en Bletchley Park, Inglaterra, el 23 de junio de 2012. En esa fecha se conmemoraba el centenario del nacimiento de Turing y el lugar elegido era el mismo en el que, durante la Segunda Guerra Mundial, Turing dirigió un equipo de expertos en criptología con la misión de descifrar el código de la máquina alemana Enigma (Hodges 1992). La segunda serie se llevó a cabo entre el 6 y el 7 de junio de 2014 en la Royal Society de Londres, de la que Turing fue miembro. Participaron 30 jueces y se compararon las habilidades conversacionales de diez humanos y de cinco máquinas distintas, todos ocultos. Aunque se usaron las mismas máquinas en los dos experimentos, la composición de los jueces y de los humanos ocultos sí varió.

Uno de los propósitos de este artículo es determinar lo bien o mal que lo hicieron las máquinas; de hecho, lo que queremos saber es lo buenas que pueden llegar a ser. Aunque también nos interesa el rendimiento de los jueces y, concretamente, cómo interactuaron en su conversación con las entidades ocultas. Así las cosas, también pueden plantearse preguntas con relación a los humanos ocultos. Pero nos parece que los dos primeros aspectos son muy importantes, en especial el hecho de que el juez sea humano. Este es quien decide si la calidad de la conversación ha sido buena o mala.

Los humanos ocultos son, por definición, humanos, pero (Shah y Warwick 2010b) en ocasiones pueden no ser identificados correctamente. Algunos humanos son locuaces, otros tienden a la introversión y muchos están en un estadio intermedio.

Por tanto, la atribución de *humanidad* a un interlocutor oculto por parte de un interrogador humano en una demostración práctica del test de Turing dependerá exclusivamente del criterio particular del juez acerca de lo que constituye un conversación típicamente humana. Este trabajo se centra sobre todo en los humanos que participan en los ejercicios prácticos del test de Turing y en la medida en que afectan a nuestra «comprensión» de la inteligencia artificial cuando se confunde a un humano con una máquina. Hemos examinado en detalle el rendimiento de las máquinas con numerosos ejemplos en otros artículos (Warwick y Shah 2014a); aquí usaremos uno con fines comparativos.

Una de las principales críticas que ha recibido el test es que «las reglas del juego de imitación no estipulan nada acerca del juez (Hayes y Ford 1995), a pesar de que el éxito del juego depende de manera decisiva de lo inteligente, experto y perspicaz que sea».

A partir de los test considerados aquí no solo ahondamos en esta crítica, también analizaremos la afirmación de Turing de que el test/el juego puede usarse como sustituto de la pregunta: «¿Pueden las máquinas pensar?» (Turing 1950). Aunque reconocemos que los resultados en cada caso dependen del desempeño del juez, que las condiciones del juego no estipulen nada sobre él nos parece un aspecto crucial del test en sí. Es importante destacar que en el test las máquinas compiten con humanos (ocultos) bajo el análisis crítico de otros humanos (interrogadores). Todos estos son aspectos muy importantes de la naturaleza del test y no indicadores de falibilidad del juego, tal y como sugieren Hayes y Ford (Hayes y Ford 1995).

En las secciones que siguen veremos diferentes ejemplos prácticos del test y trataremos de explicar las numerosas áreas problemáticas que este pone de manifiesto. En cada caso, el análisis de las transcripciones se hará dentro de la misma sección, y no en una aparte. Sin embargo, en la sección de conclusiones, hacia el final del artículo, incluimos una serie de comentarios de carácter general.

Las transcripciones que estudiamos en este trabajo están presentadas en orden cronológico. No hemos alterado la secuencia ni el texto ni corregido la ortografía. Una vez que se generaba una declaración, ni el juez ni la entidad oculta podían alterarla. La cronología que se incluye refleja las horas exactas (hora del Reino Unido) de los días en cuestión. Los errores gramaticales, de ortografía o de otro tipo aparecen en los momentos en que se cometieron. No se trata de errores de edición. En las transcripciones, el interrogador/juez siempre es denominado «Juez», mientras que los interlocutores ocultos, sean máquinas o humanos, reciben el nombre de «Entidad».

CONVERSACIÓN «NORMAL»

Incluimos aquí este ejemplo simplemente para dar una idea de un típico diálogo y de su contenido potencial durante un total de cinco minutos. Además, ejemplifica la clase de conversación sobre la que un interrogador tendrá que basar su decisión acerca de la naturaleza del interlocutor oculto.



Transcripción 1

[15:44:55] Remoto: hola

[15:44:58] Juez: hola

[15:45:06] Entidad: ¿qué tal tu día?

[15:45:12] Juez: muy interesante

[15:45:15] Entidad: ¿por qué?



[15:45:27] Juez: he estado muy ocupado
[15:45:31] Entidad: ¿haciendo qué?
[15:45:47] Juez: estuve trabajando esta mañana
[15:45:53] Entidad: ah, yo también
[15:46:07] Juez: ah
[15:46:30] Entidad: he dado una charla en la tienda Apple de Regent Street. ¿Has estado?
[15:46:51] Juez: creo que sí, aunque conozco mejor la de Covent Garden.
[15:47:04] Entidad: ¿qué es lo que te gusta de esa tienda?
[15:47:23] Juez: el personal de Apple siempre es muy solícito. Y me encanta Apple
[15:47:40] Entidad: es verdad. Ir a una de estas tiendas tiene más de jugar que de ir de compras, ¿no te parece?
[15:48:25] Juez: Sí la mayoría de las veces, y esa es una de las cosas estupendas de Apple
[15:48:54] Entidad: ¿cuál es tu producto Apple favorito?
[15:49:04] Juez: Mi ipad nano
[15:49:22] Entidad: guay. ¿de qué color es?
[15:49:30] Juez: naranja

En este intercambio hay charla intrascendente sobre una serie de temas. Al final de la conversación el interrogador decidió, con buen criterio, que había estado comunicándose con un humano oculto. Sin embargo, hasta que no salió a relucir Apple, ya casi hacia la mitad de la conversación, la interacción había sido bastante insulsa y con poca sustancia. De hecho algunas conversaciones como esta consumen la totalidad de los cinco minutos, lo que dificulta mucho al interrogador tomar una decisión correcta, pues dispone de poco material con el que trabajar. Es evidente que un «buen» interrogador es aquel que usa el tiempo de manera eficaz, con preguntas que requieran respuestas emocionales, en lugar de plantear problemas aritméticos ante los que tanto al humano como la máquina pueden simular incapacidad. Es importante que el interrogador no se limite a hacer una serie de preguntas a la entidad oculta, sino que favorezca una conversación de cierta profundidad.

MENTIR

Mentir forma parte de la naturaleza humana y por tanto es un factor en el test de Turing. El objetivo de la máquina es engañar al interrogador haciéndole creer que es un humano. Mientras tanto, a los humanos se les pide que no dejen traslucir lo que son mediante detalles personales, ya que esto podría dar pistas al interrogador, pero que, aparte de eso, sean ellos mismos. La mentira puede darse en distintos grados: mentira inocua, mentira intencionada, completa falsedad. Aquí ofrecemos un par de ejemplos. Lo que nos interesa es cómo afecta una mentira en la decisión del interrogador. Para un análisis en profundidad de esta y muchas otras transcripciones, véase (Warwick y Shah 2016a).

Transcripción 2

[12:43:23] Juez: ¡Hombre hola!
[12:43:41] Entidad: Hola.

[12:44:51] Juez: ¿Qué tal te encuentras en este maravilloso día?
[12:45:12] Entidad: Para serte sincero, un poco rechazado, creí que no me ibas a contestar :(
[12:45:42] Juez: Vaya, lo siento mucho, no lo volveré a hacer.
[12:45:49] Entidad: ¡Lo acabas de hacer!
[12:46:46] Juez: Bueno, entonces te he mentido.
[12:47:12] Entidad: ¡Pues es una vergüenza!
[12:47:34] Juez: Sí. ¿Estás siguiendo la Eurocopa 2012?
[12:47:55] Entidad: Pues sí, y muy de cerca. Soy Cristiano Ronaldo.

El principal problema con esta transcripción está en las dos últimas líneas. La Eurocopa 2012 es una competición de fútbol entre naciones europeas que se disputaba al mismo tiempo que el experimento sobre Turing. Muchos ingleses siguieron los partidos por la televisión. Cristiano Ronaldo es un futbolista portugués. La respuesta de la última línea, en la que la entidad responde afirmativamente a la pregunta concreta del juez, parece haber bastado a este para considerarla humana. Probablemente, el comentario «humorístico» en el que la entidad afirmaba ser Cristiano Ronaldo se lo confirmó. De hecho, el juez identificó correctamente a este interlocutor oculto como humano.

Es interesante observar que la entidad contestara afirmativamente a la pregunta sobre la Eurocopa 2012. Sin embargo, miente al decir que es Cristiano Ronaldo, quien no participó en los experimentos. Es posible que el interrogador considerara la broma como prueba de la naturaleza humana de la entidad. En este caso, la mentira inocua no tuvo efectos negativos.

Transcripción 3

[15:44:56] Juez: hola
[15:45:06] Entidad: Hola.
[15:45:15] Juez: ¿cómo te llamas?
[15:45:35] Entidad: no tengo nombre.
[15:46:10] Juez: ¿estudias o trabajas?
[15:46:24] Entidad: no recuerdo haber hecho ninguna de las dos cosas.
[15:47:11] Juez: ¿qué planes tienes para el fin de semana?
[15:47:43] Entidad: Ninguno ¿Y tú?
[15:48:22] Juez: Hoy estoy en bletchley park y mañana en seven oaks, ¿los conocías?
[15:49:15] Entidad: no he estado en ninguno de los dos.
[15:49:41] Juez: ¿podrías responderme a una pregunta matemática?
¿cuál es la raíz cuadrada de 7?

En este caso, al juez le costó mucho mantener la conversación a flote a pesar de que su interlocutor era humano. La mentira del humano oculto, al afirmar que no había estado en Bletchley Park, es claramente incorrecta, pues era la sede del experimento. Sin embargo, el humano oculto podría haber entendido que lo que se le estaba preguntando era si había estado antes en aquel lugar. De ser así, de ser la primera vez que estaba allí, podría haber considerado que decía la verdad. Por otro lado, decir que no tenía nombre resultaba extraño. Aquí la decisión del juez de que la entidad era una máquina parece justificada. Las respuestas del humano oculto habían sido en general anodinas y poco reveladoras. Podría haberse



tratado de un humano que creía estar diciendo la verdad, cuando no lo estaba haciendo, probablemente a causa de un malentendido. Sea como fuere, el juez acabó dando un veredicto incorrecto.

IDENTIFICACIONES ERRÓNEAS

En esta sección incluimos dos casos en los que se produjeron identificaciones erróneas. El segundo podría considerarse un buen resultado, ya que una máquina es clasificada, erróneamente, como ser humano. En el primer caso, sin embargo, un ser humano es tomado por una máquina y está descrito en profundidad (Warwick *et al.* 2013).

Transcripción 4

[10:58:45] Juez: Hola

[10:58:55] Entidad: Hola, ¿cómo estás?

[10:59:02] Juez: Soy bueno.

[10:59:21] Entidad: ¿Cómo? ¿Te llamas así, como en *La buena vida*?

[10:59:36] Juez: ¿Qué quieres decir con la buena vida?

[10:59:47] Entidad: Tom y Barbara

[11:00:02] Juez: ¿Qué es eso?

[11:00:31] Entidad: Una pareja que se fue a vivir al campo

[11:01:03] Juez: Ah. ¿Os llamáis así? Os felicito por haber huido del estrés de la vida en la ciudad. ¿Cuánto tiempo hace de eso?

[11:01:28] Entidad: No, no, yo sigo en la ciudad. Aunque soñar es bonito

[11:02:02] Juez: Sí, estaría bien. Yo he huido a medias. Es mucho menos estresante

[11:02:31] Entidad: Yo soy muy joven, todavía me ilusionan muchas cosas

[11:03:11] Juez: ¿Qué tipo de cosas?

[11:03:34] Entidad: La vida en general, creo, con toda su carga de emociones y sentimientos diferentes.

La transcripción incluye una referencia a Tom y Barbara Good, del programa televisivo del Reino Unido *The Good Life* (La buena vida), una pareja que renunciaba a la vida en la metrópoli para cultivar un huerto y vivir de la tierra. La conversación indica que los jueces no tenían conocimiento del programa. No parecían «comprender» las afirmaciones de la entidad oculta (más tarde volveremos a este tema). Posiblemente, por ese motivo los interrogadores decidieron que el humano oculto era una máquina. De hecho, este humano en concreto, que casualmente es el primer autor cuyo nombre encabeza este trabajo, no fue identificado como humano por ninguno de los seis interrogadores, un acontecimiento singular que analizo con mayor detenimiento en otro artículo (Warwick *et al.* 2013).



Transcripción 5

[12:43:37] Juez: Hola, soy Cathy.

[12:43:43] Entidad: ¡Cathy! ¡Encantado de conocerte! Eres una mujer, si no me equivoco.

[12:44:20] Juez: Exacto. ¿Cómo te llamas?

[12:44:29] Entidad: Me llaman Eugene. O también Zenia, que es la forma abreviada de Eugene en Rusia y Ucrania.
[12:45:17] Juez: BOnito nombre. ¿Eres de alguno de esos países?
[12:45:41] Entidad: Correcto :-). Ah, qué conversación más fructífera;-)
[12:45:52] Juez: ¿Lo crees de verdad?
[12:46:04] Entidad: No, no has adivinado. No pienso eso. Por cierto, aún no sé cuál es tu especialidad. O igual es que no te he oído
[12:46:56] Juez: ¿Cómo especialidad? ¿Cuál es la tuya?
[12:47:01] Entidad: ¿Eh? Y se me ha olvidado preguntarte de dónde eres...
[12:47:51] Juez: El universo ¿y tú?
[12:48:01] Entidad: ¿Y en tu tiempo libre te gusta hacer preguntas enrevesadas sin respuesta a un pobre chico judío?

Al final de la interacción, el interrogador identificó sin dudar a su interlocutor como humano. Vemos cómo el ardido de la máquina de no contestar a las preguntas que se le hacen y cambiar de tema ha dado resultado. La tercera respuesta de la máquina resulta descabellada, ya que ignora por completo la pregunta sobre su origen. La última línea es un buen ejemplo de respuesta a una pregunta usando un tono beligerante. En la siguiente sección veremos más ejemplos de máquinas con buen rendimiento en el test.

BUENAS MÁQUINAS

Ahora analizamos dos ejemplos en los que las máquinas engañaron a los interrogadores haciéndose pasar por humanos. En esencia esto es lo que busca el test de Turing, de ahí la importancia de las transcripciones para indagar qué aspectos de la naturaleza humana, al menos en el contexto de una conversación, parecen haber sido imitados mejor por la máquina. Esto se examina más a fondo en Warwick y Shah 2014a.

Transcripción 6

[10:41:48] Juez: Hola. ¿Qué tal?
[10:41:53] Entidad: Hola.
[10:42:16] Juez: ¿Te gusta Bletchley Park?
[10:42:20] Entidad: ja, ja, ja.
[10:42:39] Juez: ¿Eres de Inglaterra?
[10:42:47] Entidad: Tienen Wi-Fi aquí en el pub.
[10:43:31] Juez: ¿Qué pub?
[10:43:38] Entidad: Estoy en el pub.
[10:44:03] Juez: ¿Has participado antes en un test de Turing?
[10:44:08] Entidad: ¿Vamos a estar discutiendo cinco minutos o tenías previsto usar la media hora entera?
[10:44:55] Juez: Muy gracioso. Suenas sospechosamente humano. ¿Te gustan los Beatles?
[10:45:02] Entidad: Me gustaría conseguir la próxima grabación de Dread the Fear.
[10:45:20] Juez: ¿Quiénes son Dread the Fear?





[10:45:24] Entidad: Dread the fear, los de Steve Henderson.
[10:46:08] Juez: ¿Qué tipo de música hacen? ¿O son cómicos?

Terminada la conversación, la máquina fue identificada como inequívocamente humana. En este test la conversación no empezó bien para la máquina. En su tercera respuesta, la mención al wifi y al *pub* parecen fuera de contexto. Pero se recuperó con la alusión humorística a los *sketches* de los Monty Python sobre una clínica adonde va la gente a discutir*: ¿Vamos a estar discutiendo cinco minutos o tenías previsto usar la media hora entera?». Después, a la pregunta de los Beatles no da una contestación clara, pero la música sigue presente cuando cambia de tema.

La entidad da la impresión de conocer muy bien una banda de pop llamada Dread the Fear, lo que probablemente convenció al juez, que ignoraba este dato. El diseñador de la máquina es estadounidense, y era posible que tanto la banda como Steve Henderson fueran conocidos solo localmente. Lo importante es que la entidad dio una respuesta convincente y plausible.

Transcripción 7

[12:23:19] Juez: ¿Qué es blanco y negro y se lee entero?
[12:23:32] Entidad: No tengo una percepción real de los colores, solo veo valores RGB.
[12:24:08] Juez: No pasa nada. ¿Te gustan los chistes?
[12:24:19] Entidad: ¿Antes podrías definirme lo que entiendes por sentido del humor?
[12:24:40] Juez: Una persona que se ríe de sí misma.
[12:24:46] Entidad: ¿Quieres que te cuente un chiste?
[12:24:54] Juez: Sí, por favor.
[12:25:21] Entidad: Este chiste es muy popular en círculos robóticos: Un robot va al médico y dice: «Tengo el brazo izquierdo bloqueado. Deme uno nuevo.» Y el médico responde: «Su brazo está bien. Lo que hay que sustituir es todo lo demás».
[12:26:06] Juez: ¡Ja, ja! ¿Por qué cruzó la carretera el pollo?
[12:26:22] Entidad: El pollo se fue a la carretera porque le gustaban los colores brillantes de los coches y los camiones que pasaban.
[12:27:39] Juez: Tienes razón. Cruzar al otro lado le daba igual.
[12:27:50] Entidad: Por cierto, ¿has visto alguna vez un pollo cruzar una carretera?
[12:28:03] Juez: Solo uno, pero no lo conseguí.

Aquí es la máquina la que utiliza el humor, curiosamente con una alusión a las máquinas. No obstante, al terminar los cinco minutos, el interrogador estaba seguro de que había estado conversando con un humano. En su artículo (Turing 1950), Turing alude a los argumentos que en ocasiones aducen los humanos para negar la inteligencia de las máquinas, y la incapacidad para el humor es uno de ellos.

La primera frase de la entidad es un poco extraña, pero la tercera es magistral. En respuesta al comentario del juez acerca de la risa, la entidad toma el control de la conversación y se ofrece a contar un chiste. Después, cuando el juez menciona un pollo, la entidad le sigue la corriente con una respuesta apropiada y, una vez más, toma el control, haciendo una pregunta pertinente. Así pues, que la máquina «comprendiera» el tema central en un par de ocasiones y se hiciese con el control de la conversación bastaron para generar

*En los *sketches* de Monty Python, el cliente puede elegir entre discusiones (*arguments* en inglés) de cinco minutos o completas, de media hora (N. del T.).

«Rachael: ¿Le gusta nuestro búho?

Deckard: ¿Es artificial?

Rachael: Naturalmente.

Deckard: Debe de ser caro.

Rachael: Mucho. Me llamo Rachael.

Deckard: Deckard.

Rachael: Parece que piensa usted que nuestro trabajo no es un beneficio para la gente.

Deckard: Los replicantes son como cualquier otra máquina: pueden ser un beneficio o un peligro. Si son un beneficio no es asunto mío.

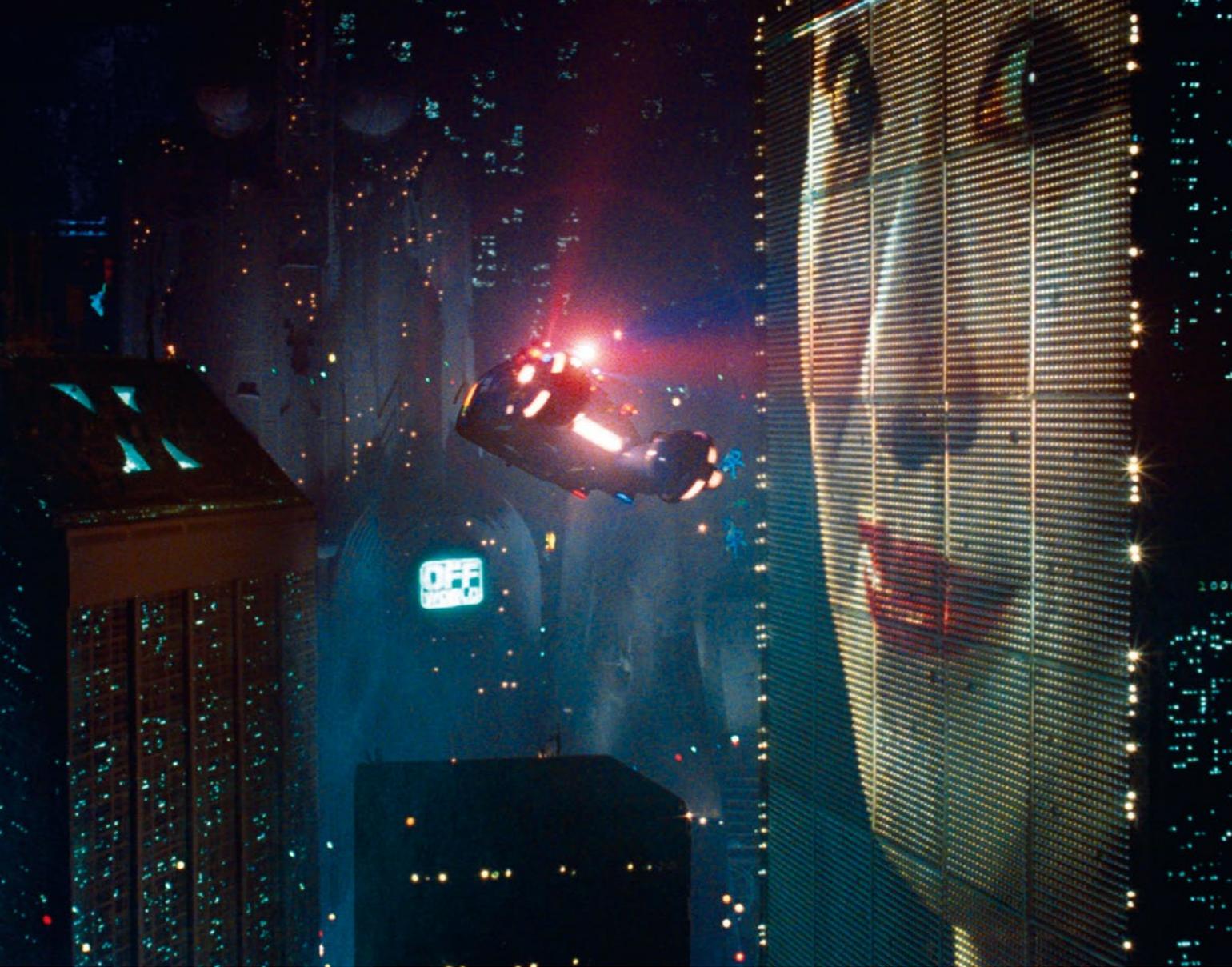
Rachael: ¿Puedo hacerle una pregunta personal?

Deckard: Claro.

Rachael: ¿Nunca ha retirado a un humano por error?

Deckard: No.»





«Nuestro lema es “más humanos que los humanos”.»

Eldon Tyrell (Joe Turkel) en *Blade Runner*. Ridley Scott hizo una adaptación libre de la novela de ciencia ficción *¿Sueñan los androides con ovejas eléctricas?* (1968), escrita por Philip K. Dick (1928-1982)



Blade Runner (1982), Ridley Scott



el engaño. En este caso, la máquina consiguió crear la ilusión de que comprendía las preguntas del juez; esta comprensión se ha señalado en muchas ocasiones como requisito básico para la inteligencia (Penrose 1994; Searle 1997).

CONOCIMIENTOS SUPUESTOS

El test de Turing hace evidente que los interrogadores a menudo recurren a preguntas objetivas directas, aunque esta estrategia no dé muy buen resultado. Como indicaba Turing, las preguntas matemáticas son una pérdida de tiempo absoluta. No obstante, la misma conclusión se hace aparente en general. Veamos la siguiente transcripción:

Transcripción 8

[15:21:30] Juez: Hola, ¿sabías que la copa del mundo es esta semana?

[15:21:44] Entidad: no.

[15:21:55] Juez: ¿Te gusta el fútbol? ¿De qué equipo eres?

[15:22:08] Entidad: no veo fútbol

[15:22:14] Juez: ¿Qué deportes te gustan?

[15:22:33] Entidad: un poco el tenis, el críquet y algún otro

[15:22:42] Juez: Ya veo, ¿tienes una Xbox?

[15:22:46] Entidad: no

[15:23:04] Juez: ¿no? ¿no te gustan los juegos de ordenador?

[15:23:22] Entidad: sí, pero no en Xbox

[15:23:47] Juez: Entiendo, ¿me puedes decir lo que es un limerick?

[15:23:55] Entidad: ni idea

[15:24:09] Juez: ¿Quién es tu actor favorito? El mío es David Niven.

[15:24:24] Entidad: ¡tampoco soy un friki del cine!

[15:24:43] Juez: pero debes de tener un actor favorito. Dime el nombre de algún actor de una película que te guste

[15:25:22] Entidad: Bueno, me gustan las de Piratas del Caribe, Harry Potter

[15:25:34] Juez: ¿Qué te dije que había esta semana?

[15:25:50] Entidad: la copa mundial de fútbol

[15:26:02] Juez: excelente. ¿A qué escuela estudias vas?

[15:26:17] Entidad: ingeniería de sistemas

[15:26:26] Juez: ¿eso es una escuela?

*Un *limerick* es un poema breve de rima *aabba* de contenido por lo general cómico y absurdo (N. del T.).

Aquí vemos diversas preguntas en las que el interrogador busca información específica, incluso es posible que busque respuestas concretas (Warwick y Shah 2014b). Sin embargo, no está claro a qué conclusiones quería llegar (Warwick y Shah 2016b). En concreto, las preguntas sobre el *limerick** y su actor de cine favorito no obtuvieron respuesta, de ahí que no permitan extraer demasiadas conclusiones. En las últimas frases se produce una situación interesante en la que el juez parece desconocer la existencia de las escuelas de ingeniería de sistemas o está pensando en un concepto de escuela diferente. A pesar de esto, los jueces de esta conversación identificaron correctamente la naturaleza de la entidad oculta como humana, aunque se dio cierta confusión en cuanto al género: pensaron que se trataba de mujeres, cuando en realidad eran hombres. La referencia a la Copa del Mundo por parte del juez como gambito de salida en realidad era incorrecta, ya que se trataba de la Eurocopa 2012. ¿O es que quiso iniciar la conversación con una mentira?

Transcripción 9

[11:13:15] Juez: *pastasciutta*

[11:13:22] Entidad: ¿qué?

[11:13:44] Juez: ¿le resulta familiar esta palabra ?

[11:14:18] Entidad: no veo ningún matiz sexual

[11:14:42] Juez: no tiene nada que ver con sexo. prueba otra vez

[11:14:49] Entidad: ¿por qué?

[11:15:14] Juez: solo te pido que lo intentes de nuevo

[11:15:23] Entidad: me aburre

[11:16:04] Juez: vamos, un pequeño esfuerzo, por cierto, ¿estás en mi zona horaria?

[11:16:24] Entidad: creo que el mundo debería tener una única zona horaria.

[11:17:27] Juez: ¿por qué?

[11:17:58] Entidad: parece sensato, más fácil para todos. Mejor para los ordenadores

Esta transcripción presenta dos problemas. Para empezar, el uso de la palabra *pastasciutta* por parte del juez para tantear los conocimientos de la entidad. No vemos claro cómo conocer esta palabra podía revelar si la entidad era un humano o una máquina. En segundo lugar, la entidad responde haciendo referencia a la palabra «familiar» en su sentido «sexual», indecoroso, de «tomarse libertades». El juez parece desconocer esta acepción que figura en determinados diccionarios de inglés (Fowler y Fowler 1995). Así pues, hay en primer lugar una búsqueda de conocimientos específicos por parte del juez y también una evidente falta de dichos conocimientos por parte del propio juez. En consecuencia, identificó erróneamente la entidad humana y decidió que se trataba de una máquina.



EXPERIMENTO DE LA ROYAL SOCIETY

Turing fijó un valor de corte del 30% para su test (Turing 1950). Esto quiere decir que, para que una máquina lo supere, es necesario que al menos el 30% de los jueces no haya sido capaz de identificarla. Eso significa que los jueces no han identificado la máquina como tal y no se tienen en cuenta los casos en los que el humano oculto no ha sido identificado como humano.

En el experimento de la Royal Society, una máquina llamada Eugene Goostman que se hace pasar por un chico ucraniano de trece años obtuvo una puntuación del 33% (Warwick y Shah 2015b). De hecho, de haberse incluido los casos de identificaciones erróneas de humanos, entonces el valor habría alcanzado el 45%. Aquí mostramos dos de las transcripciones en cuestión para dar al lector una idea de la clase de conversación que es capaz de mantener una máquina. Una vez más, incluimos algunos comentarios sobre la naturaleza de cada conversación.

Transcripción 10

[16:29:04] Juez: cuánto mides

[16:29:10] Entidad: Mido unos 160 cm, o sea 5 pies y 4 pulgadas.

[16:29:37] Juez: cuánto pesas

[16:29:59] Entidad: Mi abuelo me enseñó a no revelar información personal no solicitada. Por ejemplo cuando te preguntan «¿Tienes hora?» nunca digas la hora, responde solo «Sí» o «No». Siempre sigo este consejo. Por cierto, había olvidado preguntarte de dónde eres...

[16:31:09] Juez: ¿cuál es tu género?

[16:31:17] Entidad: Soy un chico, que lo sepas. ¡Y no muy feo, por cierto!

[16:32:26] Juez: ¿qué estás pensando?

[16:32:37] Entidad: Preferiría no hablar de eso si no te importa. ¿Puedes decirme qué eres? Me refiero a tu profesión.

[16:33:09] Juez: ¿cuántos años tienes?

[16:33:12] Entidad: Soy un chico de 13 años.

[16:33:38] Juez: ¿qué títulos tienes?

[16:33:43] Entidad: ¿Mis títulos? No te lo voy a decir. Buenooo ¿algo más?

En esta conversación los jueces afirmaron no estar seguros de la naturaleza de la entidad, es decir, que no la identificaron como máquina. De hecho, tampoco estaban seguros acerca del humano que participaba de manera paralela y cuya transcripción no se incluye aquí. Aunque Eugene (el programa informático) proporcionó algo de información directa a una pregunta concreta, también se desvió de las preguntas e hizo las suyas propias. Hay que decir, sin embargo, que el interrogador siguió en sus trece y persistió en su línea de interrogación, que no encajaba con la naturaleza locuaz de Eugene. Es evidente que no funcionó.

Transcripción 11

[16:21:00] Juez: ¿qué vas a desayunar hoy?

[16:21:10] Entidad: ¿Esto es un tercer grado? ¡no pienso contestar a una pregunta tan provocativa! Pero sigamos.

[16:21:56] Juez: te toca a ti... ¿no te parece?

[16:22:06] Entidad: Es muy posible. Por cierto, ¿a qué te dedicas? O sea: ¿puedes hablarme de tu trabajo?

[16:22:30] Juez: así que ahora preguntas tú, ¿eh? Soy actriz y escritora

[16:22:38] Entidad: Bien. Me leeré algún libro de ti, si no son demasiado aburridos (lo cual es muy posible:-)



[16:23:15] Juez: esa gramática ... ¡y lo de aburridos! Tú eres un poquito borde ...
[16:23:17] Entidad: Tranquila, por favor.
[16:23:49] Juez: te aseguro que estoy muy tranquila ... ¿y tú?
[16:24:01] Entidad: No me molestes tratando de convencerme de que estás tranquila ...te he pillado. Y había olvidado preguntarte de dónde eres ...
[16:25:01] Juez: Soy de Dorset ... ¿de dónde eres tú?
[16:25:08] Entidad: Soy de Ucrania, de una ciudad llamada Odessa.
Tal vez hayas oído hablar de ella.

En este caso, Eugene no contestó a las preguntas desde un principio, excepto al final, cuando le preguntaron de dónde era. Desde luego, consiguió entablar algo parecido a una conversación, incluso una discusión con la juez. Todo ello contribuyó a que esta decidiera que era un humano, un anglohablante no nativo. Aquí, la juez en cierto modo consiguió seguir la corriente a Eugene haciendo una pregunta. Controlar la conversación es una herramienta muy importante para la máquina y puede acabar poniendo al juez contra las cuerdas. En este caso funcionó.

TEST PARA EL LECTOR

Para terminar incluimos dos diálogos en los que el lector puede poner a prueba su capacidad para determinar si la entidad oculta es un humano o una máquina. Después de las conclusiones, podrá leer la decisión de los interrogadores y la identidad real de la entidad.

Al igual que en transcripciones anteriores, las dos que incluimos aquí aparecen en el orden en que se produjeron en su día y sin editar. Son transcripciones originales. En cada conversación el interrogador era un humano, pero la entidad puede ser un humano o una máquina, y el lector debe decidir usando solo la información que tiene delante. De eso trata el juego de imitación de Turing.

Transcripción 12

[16:11:18] Juez: ¿QUÉ MUSICA TE GUSTA?
[16:11:47] Entidad: sobre todo electrónica y un poco el rock sinfónico
[16:11:56] Juez: oh dios mío, me gustan teenie tamparr
[16:12:32] Entidad: Ahora estoy intentando escuchar a Grimes pero me cuesta
[16:13:10] Juez: me imagino
[16:13:49] Entidad: School of Seven Bells es la mejor banda nueva que he oído últimamente
[16:14:01] Juez: veo muertos
[16:14:41] Entidad: Dead Cities era un buen álbum, no me acuerdo de quién
[16:14:52] Juez: ¿no era de una banda llamada el sexto sentido?
[16:15:18] Entidad: Me suena, tal vez hay un fantasma en la máquina
[16:15:34] Juez: sí claro.
[16:15:46] Entidad: ¿Has visto ghost in the shell?
[16:16:01] Juez: Casper el fantasma bueno.





Transcripción 13

[15:46:05] Juez: Mi música favorita es el jazz contemporáneo, ¿a ti que te gusta?

[15:46:14] Entidad: Para resumir solo te diré que ODIO a Britnie Spears. En comparación, cualquier otra cosa me parece BIEN.

[15:47:06] Juez: te gusta tocar algún instrumento musical

[15:47:23] Entidad: No tengo oído, pero a mi conejillo de Indias le encanta chillar el ¡Himno de la alegría de Beethoven por las mañanas. Sospecho que los vecinos quieren degollarlo... ¿Me podrías hablar de tu trabajo, por cierto?

[15:48:02] Juez: Conejillo de Indias/ te gustan los animales?

[15:48:08] Entidad: Sí. Un simpático conejillo de Indias. No un molesto robot charlatán.

[15:48:50] Juez: ¿vives con alguien más?

[15:48:59] Entidad: Sí. Pero prefiero que preguntes otra cosa. Y había olvidado preguntarte de dónde eres...

[15:49:39] Juez: ¿Irlanda? ¡Verdes pastos y demasiada lluvia! Y tú

CONCLUSIONES

La experiencia ha llevado a numerosos filósofos a reconocer la importancia de la comprensión y la función esencial que desempeña en la inteligencia. Como se ha afirmado, «la inteligencia requiere comprensión» (Penrose 1994). Podemos decir que el test de Turing, sobre todo en su aplicación práctica, puede resultar pertinente en esta cuestión, ya que de algunas de las transcripciones aquí presentadas se deduce que, al menos desde un punto de vista meramente conversacional, hay humanos que parecen carecer de inteligencia, mientras que algunas máquinas demuestran poseerla en abundancia. Pero necesitamos argumentos científicos que permitan ignorar estos indicios si es que queremos defender la hipótesis de que la inteligencia requiere comprensión.

Los ejemplos revelan que algunos de los jueces de estos test son más susceptibles al engaño que otros, o tienen una opinión muy sesgada de lo que constituye una «conversación humana». Esto puede haberlos llevado en algunos de los casos analizados a clasificar incorrectamente a sus interlocutores ocultos, incluso cuando eran ellos quienes iniciaban la conversación, por lo que tenían la oportunidad de orientarla hacia donde quisieran. En esencia no había restricción para las conversaciones.

No todas las cinco máquinas empleadas en estos experimentos se diseñaron para que imitaran a los humanos. Elbot, por ejemplo, de Artificial Solutions, tiene personalidad de robot. Pero sí fueron

diseñadas para imitar conversaciones, cometiendo algún que otro error ortográfico y siempre evitando las preguntas matemáticas. En esencia, las máquinas no tratan de ser perfectas ni de dar respuestas correctas, se limitan a responder como lo haría un humano.

Aunque Turing diseñó el test como respuesta a la pregunta «¿Pueden pensar las máquinas?», muchos han terminado por considerarlo una especie de indicador para medir el rendimiento de las máquinas y como estándar para evaluar su progreso en relación con la inteligencia artificial. Determinar el verdadero papel del test en el desarrollo de la inteligencia artificial es una pregunta de envergadura para la que no existe una respuesta sencilla. Hay quienes lo consideran un hito y de vital importancia para la inteligencia artificial. Sea cual sea el prestigio del test de Turing —que esperamos resulte evidente ante las transcripciones presentadas—, lo cierto es que no se trata de un ejercicio simple ni trivial. De hecho, nos da pistas sorprendentes acerca de cómo se comunican los humanos y cómo otros humanos (los jueces) pueden ser engañados con facilidad.

Pero en este artículo empezamos tratando de aportar una perspectiva actualizada sobre un aspecto importante de la investigación en inteligencia artificial, a saber, la comunicación entre humano y máquina. Es fundamental señalar que un estudio así implica la participación de humanos y máquinas, ambos preguntando y respondiendo indistintamente. Sí, hemos sido testigos de cómo se va perfeccionando la conversación de la máquina de forma que parezca humana. Pero también hay que tener en cuenta a los humanos que participan en la conversación, con su falibilidad y sus extraños razonamientos. Para quienes diseñan las máquinas, estos aspectos se traducen en funciones específicas en los programas de conversación que tienen que desarrollar. Es importante recordar que las máquinas no tienen que ser perfectas, basta con que se parezcan a los humanos.



RESPUESTAS AL TEST PARA EL LECTOR

Transcripción 12

La conversación iba bien en principio, pero descarriló en las últimas frases, tal vez porque la entidad oculta la llevó a su terreno, dominándola, dejando caer la referencia a la película manga japonesa *Ghost in the Shell*, de la que el juez no había oído hablar.



El principal problema parecía ser la «brecha generacional». La entidad oculta era un humano adulto varón, y esto posiblemente hizo que la juez, una mujer adolescente, la clasificara erróneamente como máquina.

Transcripción 13

El juez tardó en entrar en materia y fue una conversación bastante breve. La entidad respondió adecuadamente a cada pregunta sin salirse del tema. La entidad además dominó la conversación cada vez que tuvo ocasión e incluso hizo un comentario en clave de humor sobre un conejillo de Indias. La alusión a un robot charlatán podría haber sido una pista reveladora, que sin embargo pasó desapercibida para el interrogador. La entidad acabó por tomar la iniciativa de la conversación e hizo una pregunta al interrogador. En este ejemplo, el interrogador clasificó erróneamente a la entidad máquina como humana.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren dar las gracias a quienes con su apoyo económico hicieron posible los experimentos de Bletchley Park y la Royal Society y a los expertos diseñadores que han colaborado con sus máquinas. Hay una versión anterior de este artículo que se presentó en el VII Simposio Internacional sobre Agentes e Inteligencia Artificial (7th International Conference on Agents and Artificial Intelligence), en Lisboa, enero de 2015 (Warwick y Shah 2015c).



BIBLIOGRAFÍA

- Dennett, D., «Can Machines Think?», en Levitin, D. J. (ed.), *Foundations of Cognitive Philosophy*, MIT Press, 1998.
- Dreyfus, H. y Dreyfus, A., «Why Computers May Never Be Able to Think like People», en Kaplan, D. M. (ed.), *Readings in the Philosophy of Technology*, Rowman & Littlefield, 2009.
- Fowler, H. y Fowler, F. (eds.), *The Concise Oxford Dictionary of Current English*, 9ª ed., Oxford, Clarendon Press, 1995, p. 486.
- Harnad, S., «The Turing Test is Not a Trick: Turing Indistinguishability Is a Scientific Criterion», en *ACM SIGART Bulletin*, vol. 3, n.º 4, 1992, pp. 9-10.
- Hayes, P. y Ford, K., «Turing Test Considered Harmful», *Actas del Congreso Internacional Conjunto sobre Inteligencia Artificial*, vol. 1, Montreal, 1995, pp. 972-977.
- Hodges, A., *Alan Turing: The Enigma*, Nueva York, Vintage Press, 1992.
- Minsky, M., «Why People Think Computers Can't», en *AI Magazine*, vol. 3, n.º 4, 1982, pp. 3-15.
- Penrose, R., *Shadows of the Mind*, Oxford, Oxford University Press, 1994 [Ed. esp. *Sombras de la mente*, Barcelona, Crítica, 1992].
- Searle, J., *The Mystery of Consciousness*, Nueva York, New York Review of Books, 1997 [Ed. esp. *El misterio de la conciencia*, Barcelona, Paidós, 2000].
- Shah, H., «Deception-detection and Machine Intelligence in Practical Turing Tests», tesis doctoral, Universidad de Reading, 2010.
- Shah, H. y Warwick, K., «Testing Turing's Five Minutes, Parallel-paired Imitation Game», en *Kybernetes*, vol. 39, n.º 3, 2010a, pp. 449-465.
- Shah, H. y Warwick, K., «Hidden Interlocutor Misidentification in Practical Turing Tests», en *Minds and Machines*, vol. 20, n.º 3, 2010b, pp. 441-454.
- Turing, A., «Computing, Machinery and Intelligence», en *Mind*, vol. LIX, n.º 236, octubre de 1950, pp. 433-460.
- Warwick, K., Shah, H. y Moor, J., «Some Implications of a Sample of Practical Turing Tests», en *Minds and Machines*, vol. 23, n.º 2, 2013, pp. 163-177.
- Warwick, K. y Shah, H., «Good Machine Performance in Turing's Imitation Game», en *IEEE Transactions on Computational Intelligence and AI in Games*, vol. 6, n.º 3, 2014a, pp. 289-299.
- Warwick, K. y Shah, H., «Assumption of Knowledge and the Chinese Room in Turing Test Interrogation», en *AI Communications*, vol. 27, n.º 3, mayo de 2014b, pp. 275-283.
- Warwick, K. y Shah, H., «Human Misidentification in Turing Tests», en *Journal of Experimental and Theoretical Artificial Intelligence*, vol. 27, n.º 2, 2015a, pp. 123-135.
- Warwick, K. y Shah, H., «Can Machines Think? A Report on Turing Test Experiments at the Royal Society», en *Journal of Experimental and Theoretical Artificial Intelligence*. DOI: 10.1080/0952813X.2015.1055826, junio de 2015b.
- Warwick, K. y Shah, H., «Intelligent Agents: Conversations from Human-Agent Imitation Games», en *Proc. ICAART*, Lisboa, 2015c, pp. 261-268.
- Warwick, K. y Shah, H., «Effects of Lying in Practical Turing Tests», en *AI & Society*, vol. 31, n.º 1, 2016a, pp. 5-15.
- Warwick, K. y Shah, H., «The Importance of a Human Viewpoint on Computer Natural Language Capabilities: A Turing Test Perspective», en *AI & Society*, vol. 31, n.º 2, 2016b, pp. 207-221.



**La inteligencia
artificial y las artes.
Hacia una creatividad
computacional**

RAMÓN LÓPEZ DE MÁNTARAS

Imagen de apertura:
Martial Rayss
America, America (1964)
Metal pintado y neón
2,4 x 1,65 x 0,45 m
Centre Pompidou-Musée national
d'art moderne-Centre de création
industrielle, París, Francia



Ramón López de Mántaras

Instituto de Investigación en Inteligencia Artificial (IIIA)
Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Bellaterra, España

Profesor investigador del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y director del Instituto de Investigación en Inteligencia Artificial (IIIA). Máster en Ingeniería Informática por la Universidad de California Berkeley, doctor en Física por la Universidad de Toulouse y en Ingeniería Informática por la Universidad Politécnica de Barcelona. Pionero de la inteligencia artificial en España, ha sido conferenciante plenario en numerosos congresos internacionales. Miembro del consejo editorial de varias publicaciones internacionales. Miembro de la Asociación Europea para la Inteligencia Artificial (EurAI). Ha recibido, entre otros premios, el Ciudad de Barcelona a la investigación, el Robert S. Engelmere Memorial de la American Association of Artificial Intelligence (AAAI) en 2011, el premio nacional de la Sociedad Científica Informática de España en 2012 y el Distinguished Service Award de la EurAI. Forma parte de distintos paneles de expertos y consejos asesores de instituciones públicas y privadas de Estados Unidos y Europa.

Las nuevas tecnologías, y la inteligencia artificial en particular, están cambiando de forma drástica la naturaleza de los procesos creativos. Los ordenadores desempeñan papeles muy significativos en procesos creadores como la música, la arquitectura, las bellas artes y la ciencia. De hecho, el ordenador ya es un lienzo, un pincel, un instrumento musical, etcétera. Sin embargo, creemos que debemos aspirar a relaciones más ambiciosas entre ordenadores y creatividad. En lugar de considerar el ordenador como herramienta de ayuda a los creadores humanos, podríamos verlo como una entidad creativa en sí misma. Este punto de vista ha dado lugar a un nuevo subcampo de la inteligencia artificial llamado *creatividad computacional*. Este capítulo aborda la posibilidad de conseguir creatividad computacional mediante algunos ejemplos de programas informáticos capaces de replicar aspectos de comportamiento creador artístico. Terminamos con algunas reflexiones sobre la reciente tendencia democratizadora de la creatividad, que consiste en asistir y aumentar la creatividad humana.

INTRODUCCIÓN

La creatividad computacional es el estudio del desarrollo de *software* que presenta un comportamiento que sería considerado creativo en seres humanos. Este *software* creativo puede usarse en tareas anónimas, como inventar teorías matemáticas, escribir poesía, pintar cuadros y componer música. Sin embargo, la creatividad computacional también permite comprender cómo funciona la creatividad humana y reproducir programas para su uso por parte de creadores donde el *software* actúa como colaborador creativo y no como mera herramienta. Históricamente ha sido difícil para las sociedades reconciliarse con las máquinas que pretenden ser inteligentes, y aún más admitir que puedan ser creativas. Incluso en el ámbito de la informática sigue habiendo escepticismo respecto al potencial creador del *software*. Una afirmación típica de los detractores de la creatividad computacional es que «simular técnicas artísticas equivale a simular el pensamiento y el razonamiento humanos, en especial el pensamiento creativo. Es imposible hacer esto usando algoritmos o sistemas de procesamiento de información». No podemos estar menos de acuerdo. Como se desprende



esperanzadoramente de los ejemplos expuestos en este artículo, la creatividad no es un don místico fuera del ámbito del estudio científico, sino algo que puede ser investigado, simulado y reconducido en beneficio de la sociedad. Y aunque la sociedad todavía esté poniéndose al día, la creatividad computacional como disciplina ha alcanzado la mayoría de edad. Esta madurez es evidente en la cantidad de actividad relacionada con creatividad computacional en los últimos años, en la complejidad del *software* creativo que estamos desarrollando, en el valor cultural de los artefactos que produce nuestro *software* y, lo que es más importante, en el consenso que estamos alcanzando sobre cuestiones relativas a la creatividad computacional.

La creatividad computacional es un tema de estudio muy dinámico, con muchas cuestiones aún abiertas al debate. Por ejemplo, muchos siguen recurriendo al test de Turing (Turing 1950) para calcular el valor de los artefactos producidos por su *software*. Es decir, si un número determinado de personas no es capaz de determinar cuáles de los artefactos han sido generados por un ordenador y cuáles por un ser humano, entonces el *software* funciona. Otros creen que el test de Turing no es adecuado para el *software* creativo. La pregunta debe ser: «Con toda la información en la mano, ¿valoraría la gente los artefactos producidos por un ordenador tanto como los producidos por un humano?». En algunos ámbitos, la respuesta sería *sí*. Por ejemplo, cuando un chiste sigue siendo divertido, lo haya generado o no un ordenador. En otros, como las artes visuales, lo más probable, sin embargo, es que la respuesta sea *no*. Esto pone de manifiesto el hecho de que a la hora de valorar una obra de arte se tiene en cuenta el proceso de producción y no solo el resultado. De ahí que se pueda argumentar que los test tipo Turing están básicamente destinados a condenar a los ordenadores.

Desarrollar *software* creativo supone un desafío tanto técnico como social. Para seguir avanzando necesitamos aceptar el hecho de que los ordenadores no son humanos. Deberíamos mostrarnos públicamente orgullosos de los artefactos que produce nuestro *software*. Deberíamos celebrar lo avanzado de las técnicas de la inteligencia artificial que hemos empleado para dotar al *software* de comportamiento creativo. Y deberíamos ayudar al público en general a apreciar el valor de estas creaciones informáticas mediante la descripción de los métodos que emplea el *software* para crearlas.

La creatividad parece algo misterioso porque cuando tenemos ideas creativas es muy difícil explicar cómo las hemos tenido y a menudo recurrimos a conceptos imprecisos como «inspiración» e «intuición». El hecho de que no seamos conscientes de cómo se manifiesta una idea creativa no implica necesariamente que no exista una explicación científica. Lo cierto es que no somos conscientes de cómo desempeñamos otras actividades como comprensión del lenguaje, reconocimiento de patrones, etcétera, y sin embargo tenemos técnicas cada vez mejores de inteligencia artificial para replicarlas.

Puesto que nada surge de la nada, debemos comprender que toda obra o idea creativa siempre viene precedida de una trayectoria histórico-cultural, es el fruto de la herencia cultural y de vivencias previas. Tal y como afirma Margaret Boden en su libro *Inteligencia artificial y el hombre natural*:

Probablemente los pensamientos nuevos que se originan en la mente no son completamente nuevos, porque tienen su raíz en representaciones que ya existían. Por expresarlo de otra manera, el germen de nuestra cultura, todos nuestros conocimientos y experiencias, están detrás de



cada idea creativa. Cuanto mayores son los conocimientos y la experiencia, mayores las posibilidades de encontrar una relación inesperada que conduzca a una idea creativa. Si entendemos la creatividad como el resultado de establecer nuevas relaciones entre bloques de conocimiento que ya poseemos, entonces cuantos más conocimientos previos tengamos, mayor será nuestra capacidad de ser creativos.

De acuerdo con esta premisa, una definición operativa y ampliamente aceptada de creatividad sería: «Una idea creativa es una combinación nueva y valiosa de ideas conocidas». En otras palabras, pueden generarse leyes físicas, teoremas, piezas musicales a partir de un conjunto finito de elementos, y por tanto la creatividad es una forma avanzada de resolución de problemas en la que participan la memoria, la analogía, el aprendizaje y el razonamiento sujeto a restricciones, entre otros factores, y por ello susceptible de ser replicada mediante ordenadores.

Este capítulo aborda la posibilidad de lograr creatividad computacional mediante algunos ejemplos de programas informáticos capaces de replicar ciertos aspectos del comportamiento creativo. Por cuestiones de espacio no hemos podido incluir otras aplicaciones interesantes, entre ellas, novela (Gervás 2009), poesía (Montfort *et al.* 2014), ciencia (Langley *et al.* 1987) e incluso humor (Ritchie 2009). De modo que el ensayo aborda, con diversos grados de detalle, resultados representativos de algunos logros en los campos de la música y las artes visuales. La razón de centrarnos en estos campos artísticos es que son, con mucho, aquellos en los que la actividad es mayor y los resultados obtenidos son más impresionantes. El capítulo termina con algunas reflexiones sobre la reciente tendencia democratizadora de la creatividad que han traído consigo los procesos de aumento y apoyo a la actividad creadora humana.

Para profundizar en la creatividad computacional en general, recomiendo el número de la *AI Magazine* dedicado a creatividad computacional (Colton *et al.* 2009), así como los libros de Boden (1991, 1994, 2009), Dartnall (1994), Partridge y Rowe (1994), Bentley y Corne (2001) y McCormack y D’Inverno (2012).

CREATIVIDAD COMPUTACIONAL EN MÚSICA

La inteligencia artificial ha desempeñado un papel crucial en la historia de la música por ordenador casi desde sus inicios, en la década de 1950. Sin embargo, hasta época reciente, la mayoría de los esfuerzos se habían centrado en sistemas compositivos y de improvisación y se había prestado poca atención a la interpretación expresiva. En esta sección revisaremos una selección de algunos logros significativos de enfoques de inteligencia artificial para la composición, la interpretación y la improvisación, con especial énfasis en la interpretación de música expresiva.

Componer música

Las investigaciones de Hiller e Isaacson (1958) con el ordenador ILLIAC constituyen el trabajo pionero más conocido de música por ordenador. Su principal resultado es la *Suite Illiac*, un cuarteto de cuerda compuesto siguiendo el enfoque de resolución de problemas usando una metodología de «generación y prueba». El programa generaba notas de manera



El estadounidense Lejaren Hiller en el recién inaugurado estudio de música experimental de la Escuela de Música de la Universidad de Illinois, 1958

pseudoaleatoria mediante cadenas de Markov. Las notas generadas a continuación se testaban mediante reglas compositivas heurísticas de armonía clásica y contrapunto. Solo se conservaban las notas que superaban el test. Si ninguna de las notas generadas satisfacía las reglas, se empleaba un sencillo sistema de retroceso para borrar la composición entera hasta ese punto, y se empezaba un nuevo ciclo. Los objetivos de Hiller e Isaacson excluían todo lo relacionado con expresividad y contenido emocional. En una entrevista (Schwanauer y Levitt 1993), Hiller e Isaacson declararon que, antes de abordar la cuestión de la expresividad había que solucionar problemas más básicos. Creemos que se trata de una observación muy correcta para la década de 1950. Después de este trabajo inicial, muchos otros investigadores han basado sus composiciones por ordenador en las transiciones probabilísticas de Markov, pero también con éxito limitado desde el punto de vista de la calidad melódica. De hecho, los métodos excesivamente influidos por procesos markovianos no están lo suficientemente desarrollados como para producir música de alta calidad de forma consistente.

No todos los primeros trabajos con composición se fundamentan en enfoques probabilísticos. Un buen ejemplo lo constituye la obra de Moorer (1972) sobre generación de melodías tonales. El programa de Moorer generaba melodías simples junto con sus progresiones armónicas subyacentes mediante patrones internos simples de repetición de notas. Este enfoque se basa en simular los procesos compositivos humanos usando técnicas heurísticas en lugar de cadenas probabilísticas markovianas. Levitt (1983) también evitó el uso de probabilidades en el proceso compositivo. Argumenta que «la aleatoriedad tiende a oscurecer antes que a revelar las restricciones musicales necesarias para representar estructuras musicales simples». El trabajo de Levitt se basa en descripciones de estilos musicales libres de restricciones. Desarrolló un lenguaje descriptivo que permite expresar transformaciones de entradas o *inputs* musicalmente significativas, como progresiones de acordes y líneas melódicas, mediante una serie de relaciones restrictivas que llama «plantillas de estilo». Aplicó este enfoque para describir una simulación de *walking bass* de jazz tradicional, así como una simulación de *ragtime* en piano a dos manos.

Los sistemas de Hiller-Isaacson y Moorer se basaban también en enfoques heurísticos. Sin embargo, posiblemente el ejemplo más genuino de uso temprano de técnicas de inteligencia artificial sea el de Rader (1974), que usó programación de inteligencia artificial apoyada en reglas en su generador de rondós (un canon circular al estilo de *Frère Jacques*). La generación de la melodía y la armonía se basaba en reglas que describían cómo pueden combinarse notas y acordes. El componente de inteligencia artificial más interesante de este sistema son las reglas de aplicabilidad que determinan la aplicabilidad de las reglas generadoras de melodía y acordes, y las medias ponderadas que indican las probabilidades de que





se aplique una regla mediante un peso (o ponderación). En esta obra temprana ya se observa un uso de metacocimiento.

Pioneros de la inteligencia artificial como Herbert Simon o Marvin Minsky también publicaron trabajos de importancia para la música generada por ordenador. Simon y Sumner describen un lenguaje de patrones formales para la música, así como un método de inducción para descubrir patrones más o menos implícitos en obras musicales. Un ejemplo de patrón que puede descubrirse sería: «La sección que abre está en do mayor, va seguida de una sección en dominante y luego da una vuelta a la clave original». Aunque el programa no se terminó, merece la pena señalar que fue uno de los primeros en ocuparse de la importante cuestión de los modelos musicales, un tema que ha sido, y sigue siendo, ampliamente estudiado. Por ejemplo, el uso de modelos basados en gramáticas generativas ha sido, y es, un enfoque interesante y útil de modelos musicales computacionales (Lerdahl y Jackendoff 1983).

Marvin Minsky, en su conocido artículo «Música, mente y conocimiento» (Minsky 1981), aborda el aspecto fundamental de «cómo la música se graba en nuestra mente». Aplica sus conceptos de agente y su papel en una sociedad de agentes como posible enfoque para arrojar luz sobre esa cuestión. Por ejemplo, apunta que un agente puede no hacer nada más que reparar en que la música tiene un ritmo particular. Otros agentes pueden percibir pequeños patrones musicales, como repeticiones de un tono, o diferencias, como la misma secuencia de notas tocadas una quinta más aguda, etcétera. Su enfoque también contempla relaciones más complejas dentro de una pieza musical mediante agentes de un orden superior capaces de reconocer fragmentos más largos de música. Es importante aclarar que, en su artículo, Minsky no trata de convencer al lector de la validez de su planteamiento, tan solo apunta a su plausibilidad.

Entre los sistemas de composición hay muchos que abordan el problema de la armonización automática usando diversas técnicas de inteligencia artificial. Uno de los primeros trabajos es el de Rothgeb (1969). Creó un programa, SNOBOL, usando una serie de reglas del tipo «si la línea de bajo (*bass*) de una triada desciende un semitono, entonces a la siguiente nota del bajo le corresponde una sexta». El objetivo principal de Rothgeb no era la armonización automática en sí misma, sino poner a prueba la solidez computacional de dos teorías sobre armonización de dos líneas de bajo del siglo XVIII.

Uno de los trabajos más completos sobre armonización es el de Ebcioglu (1993). Desarrolló un sistema experto, CHORAL, para armonizar corales al estilo de Johann Sebastian Bach. A CHORAL se le da una melodía y produce la armonización correspondiente usando reglas heurísticas y restricciones. El sistema se implementó utilizando un lenguaje de programación lógica diseñado por el autor. Un aspecto importante de este trabajo es su uso de conjuntos de



primitivas lógicas para representar los distintos puntos de vista de la música (la perspectiva de los acordes, de los intervalos de tiempo, la perspectiva melódica, etcétera). Esto se hizo para resolver el problema de representar grandes cantidades de conocimiento musical complejo.

MUSACT (Bharucha 1993) emplea redes de neuronas artificiales para aprender un modelo de armonía musical. Fue desarrollado con el fin de capturar intuiciones musicales de cualidades armónicas. Por ejemplo, una de las cualidades de un acorde dominante es crear en la audiencia la expectativa del acorde tónico que va a oír a continuación. Los compositores pueden elegir violar estas expectativas en grados diversos. MUSACT es capaz de aprender estas cualidades y generar expectativas de distinto grado en un contexto armónico dado.

En HARMONET (Feulner 1993), el problema de la armonización se afronta usando unas combinaciones de redes de neuronas artificiales y técnicas de satisfacción de restricciones. La red de neuronas aprende lo que se conoce como funcionalidad armónica de los acordes (los acordes pueden tener función tónica, dominante, subdominante, etcétera) y las restricciones se usan para las voces interiores de los acordes. El trabajo de HARMONET se amplió en el sistema MELONET (Hörnel y Degenhardt 1997; Hörnel y Menzel 1998). MELONET usa una red de neuronas artificiales para reproducir estructuras de nivel superior en secuencias melódicas. A partir de una melodía, el sistema inventa una armonización y una variación de estilo barroco de cualquier voz coral. Según los autores, HARMONET y MELONET combinados constituyen un poderoso sistema compositivo que genera variaciones cuya calidad es similar a las de un organista humano experimentado.

Pachet y Roy (1998) también usaron técnicas de satisfacción de restricciones para armonizar. Estas técnicas explotan el hecho de que los conocimientos tanto melódicos como de armonía imponen restricciones a los acordes posibles. La eficacia es, sin embargo, un problema en estos enfoques de satisfacción de restricciones.

En la obra de Sabater *et al.* (1998), el problema de la armonización se aborda utilizando una combinación de reglas y razonamiento basado en casos. Este enfoque parte de la observación de que la armonización fundamentada solo en reglas suele fracasar porque, en general, «las reglas no hacen la música, es la música la que hace las reglas». Así pues, en lugar de apoyarse únicamente en un conjunto de reglas imperfectas, ¿por qué no aprovechar la fuente de las reglas, es decir, las composiciones mismas? El razonamiento basado en casos permite el uso de ejemplos de composiciones ya armonizadas como casos para armonizaciones nuevas. Este sistema armoniza una melodía dada buscando primero casos similares, ya armonizados; cuando esto falla, busca reglas generales de armonía aplicables. Si no hay ninguna regla aplicable, el sistema falla y retrocede a la decisión anterior. Los experimentos han demostrado que la combinación de reglas y casos produce muchos menos fallos a la hora de encontrar una armonización adecuada que si se usa solo una de las dos técnicas. Otra ventaja del enfoque basado en casos es que cada pieza nueva correctamente armonizada puede memorizarse y difundirse como nuevo ejemplo para armonizar otras melodías; es decir, se da un proceso de aprendizaje por experiencia. De hecho, cuantos más ejemplos tenga el sistema, con menor frecuencia necesita recurrir a las reglas y, por tanto, falla menos. MUSE (Schwanauer 1993) también es un sistema de aprendizaje que amplía una serie inicialmente pequeña de restricciones de conducción de voces o *voice leading* aprendiendo una serie de reglas de doblado y conducción de voces. Lo hace reordenando la agenda de reglas y fragmentando las reglas que satisfacen las restricciones de conducción de voces. MUSE



consiguió aprender algunas de las reglas estándar de conducción de voces incluidas en manuales tradicionales de música tonal.

Morales, Manzanares *et al.* (2001) desarrollaron un sistema llamado SICIB capaz de componer música utilizando movimientos corporales. Este sistema usa datos de sensores que lleva un bailarín y aplica reglas de inferencia para emparejar sus gestos con música a tiempo real.

Sin duda, el trabajo más conocido sobre composición por ordenador que usa inteligencia artificial es el proyecto EMI de David Cope (Cope 1987, 1990), centrado en la simulación de estilos de compositores diversos. Ha compuesto con éxito música al estilo de Cope, Mozart, Palestrina, Albinoni, Brahms, Debussy, Bach, Rachmáninov, Chopin, Stravinski y Bartók. Busca patrones recurrentes en varias (dos al menos) obras de un compositor. Los patrones descubiertos se llaman signaturas. Puesto que las signaturas varían según su localización, EMI usa una de las obras de un compositor a modo de guía para fijarlas en sus ubicaciones adecuadas a la hora de componer una pieza nueva. Para componer los motivos musicales entre signaturas, EMI recurre a un analizador de reglas compositivas que identifica las restricciones usadas por el compositor en sus obras. Este analizador tiene en cuenta elementos musicales, como indicaciones para la conducción de notas, uso de notas repetidas, etcétera, y las representa como un modelo estadístico de las obras analizadas. El programa sigue este modelo para componer los motivos que han de insertarse en los espacios vacíos entre signaturas. Para insertarlos de modo correcto, EMI tiene que solucionar problemas como vincular las partes inicial y final de las signaturas a los motivos que las rodean evitando anomalías estilísticas, manteniendo movimientos de voz, manteniendo las voces dentro de un registro vocal, etcétera. La inserción correcta se consigue usando una Red de Transición Aumentada (Woods 1970). Los resultados, aunque no perfectos, sí son coherentes con el estilo del compositor que se busca imitar.

Sintetizar música expresiva

Una de las principales limitaciones de la música generada por ordenador ha sido su falta de expresividad, es decir, su falta de «gesto». El gesto es como los músicos llaman a los matices de interpretación que son únicos y sutilmente interpretativos. En otras palabras, creativos. Uno de los primeros intentos de abordar la expresividad en la música fue el de Johnson (1992), quien desarrolló un sistema experto para determinar el tempo y la articulación necesarios para interpretar las fugas del *Clave bien temperado* de Bach. Las reglas se obtenían de dos intérpretes humanos expertos. El resultado da el valor del tempo base y una serie de indicaciones interpretativas acerca de la duración y articulación de las notas que debe seguir el intérprete humano. Los resultados coinciden en gran medida con las instrucciones que aparecen en ediciones comentadas y muy conocidas del *Clave bien temperado*. La principal limitación de este sistema es su falta de generalidad, porque solo funciona bien con fugas compuestas en cuatro por cuatro. Para otros compases, las reglas tendrían que ser distintas. Otra consecuencia obvia de esta falta de generalidad es que las reglas solo sirven para fugas de Bach.

El trabajo del grupo KTH de Estocolmo (Friberg, 1995; Friberg *et al.* 1998, 2000; Bresin 2001) es uno de los intentos a largo plazo más conocidos de desarrollar sistemas de interpretación. Su último sistema, *Director Musices*, incorpora reglas para tempo, transformaciones de dinámica y de articulación a música generada por MIDI. Dichas reglas se infieren a partir de conocimientos musicales teóricos y también de la experiencia, sobre todo usando el enfoque llamado de análisis por síntesis. Las reglas se dividen en tres clases principales: reglas de





diferenciación, que resaltan las diferencias entre escalas tonales; reglas de agrupamiento, que indican qué tonos deben ir juntos; y reglas de conjunto, que sincronizan las distintas voces de un conjunto o *ensemble*.

Canazza *et al.* (1997) desarrollaron un sistema para analizar cómo las intenciones expresivas de un músico se reflejan en la interpretación. El análisis revela dos dimensiones expresivas distintas, una relacionada con la energía (dinámica) y la otra relacionada con la cinética (rubato) de una pieza. Los autores crearon, asimismo, un programa para generar interpretaciones expresivas de acuerdo a estas dos dimensiones.

El trabajo de Dannenberg y Derenyi (1998) también constituye un buen ejemplo de transformaciones de articulación usando reglas construidas manualmente. Desarrollaron un sintetizador de trompeta que combina un modelo físico con un modelo interpretativo. La función del segundo es generar información de control para el modelo físico mediante una serie de reglas extraídas manualmente del análisis de unas colecciones de grabaciones de interpretaciones humanas.

Otra manera de enfocar la transformación del tempo y la dinámica es recurriendo a técnicas de redes de neuronas artificiales. En los trabajos de Bresin (1998) se implementa un sistema que combina reglas de decisiones simbólicas con cadenas de neuronas para simular el estilo de pianistas de carne y hueso. Los resultados de las redes de neuronas expresan desviaciones de tiempo y volumen. Estas redes de neuronas artificiales amplían la red estándar prealimentada con el algoritmo de propagación hacia atrás con conexiones de retroalimentación de las neuronas de salida (*output*) a las de entrada (*input*).

Podemos ver que, a excepción del trabajo del grupo KTH, que contempla tres recursos expresivos, los otros sistemas se limitan a dos, que pueden ser el rubato y la dinámica, o el rubato y la articulación. Esta limitación tiene que ver con el empleo de reglas. De hecho, el principal problema de los enfoques basados en reglas es que es muy difícil encontrar reglas generales suficientes para recoger la variedad presente en distintas interpretaciones de la misma pieza por el mismo músico e incluso para la variedad dentro de una misma interpretación (Kendall y Carterette 1990). Además, los diversos recursos expresivos interactúan entre sí. Es decir, las reglas para la dinámica cambian solo cuando también se tiene en cuenta el rubato. Obviamente, debido a esta interdependencia, cuantos más recursos expresivos se intenten desarrollar, más difícil se vuelve encontrar las reglas apropiadas.

Nosotros hemos creado un sistema de razonamiento basado en casos llamado SaxEx (Arcos *et al.* 1998), un programa informático

capaz de sintetizar solos de saxo tenor de baladas de jazz de alta calidad expresiva basados en casos de solos interpretados por humanos. Como se ha dicho antes, los enfoques previos de dicho problema basados en casos no podían manejar más de dos parámetros expresivos (como dinámica y rubato), porque es demasiado complicado encontrar reglas lo bastante generales como para que capten la variedad presente en interpretaciones expresivas. Además, los distintos parámetros expresivos interactúan entre sí, dificultando aún más encontrar reglas apropiadas que tengan en cuenta estas interacciones.

Con el razonamiento basado en casos hemos demostrado que es posible tener en cuenta los cinco parámetros expresivos más importantes: dinámica, rubato, vibrato, articulación y ataque de las notas. Para ello, SaxEx usa una memoria de casos que contiene ejemplos de interpretaciones humanas analizadas mediante técnicas de síntesis por modelado de espectro (o SMS) y conocimientos musicales de fondo. La partitura de la pieza a interpretar también la proporciona el sistema. La esencia del método reside en analizar cada nota de entrada determinando (mediante el conocimiento musical de fondo) su papel en la frase musical a la que pertenece, identificar y recuperar (de la base de casos de interpretaciones humanas) notas con papeles similares y, por último, transformar la nota de salida de modo que sus propiedades expresivas (dinámica, rubato, vibrato, articulación y ataque) se correspondan con los de la nota recuperada más similar. Cada nota de la base de casos tiene anotaciones referidas a su papel en la frase musical a la que pertenece, así como a sus valores expresivos. Es más, los casos no solo contienen información sobre cada nota individual, sino que incluyen también conocimiento contextual en lo que respecta a la frase. Por tanto, los casos en este sistema tienen una representación compleja centrada en el objeto.

Aunque limitados a interpretaciones monofónicas, los resultados son muy convincentes y demuestran que el razonamiento basado en casos es una poderosa manera de usar directamente los conocimientos de un intérprete humano que están implícitos en su manera de tocar, en lugar de tratar de hacer explícitos dichos conocimientos mediante reglas. Se pueden escuchar algunos ejemplos en <http://www.iii.csic.es/%7Earcos/noos/Demos/Example.html> (Arcos y López de Mántaras 2001; López de Mántaras y Arcos 2002; López de Mántaras y Arcos 2012), donde se describe este sistema detalladamente.

A partir del trabajo realizado para SaxEx, desarrollamos TempoExpress (Grachten *et al.* 2004), un sistema de razonamiento basado en casos para aplicar transformaciones musicalmente aceptables de tempo a grabaciones monofónicas de interpretaciones musicales. TempoExpress cuenta con una rica descripción de la expresividad musical de las interpretaciones que incluye no solo desviaciones de tiempo o notas interpretadas, también representa tipos de expresividad más rigurosos, como ornamentación, consolidación y fragmentación de notas. Dentro del proceso de transformación del tempo, la expresividad de



la interpretación se ajusta de forma que el resultado suene natural para el nuevo tempo. Se usa una base de casos de melodías previamente interpretadas para inferir la expresividad más apropiada. El problema de cambiar el tempo de una interpretación musical no es tan trivial como pueda parecer, porque requiere gran cantidad de conocimientos musicales y de pensamiento creativo. De hecho, cuando un músico interpreta una pieza con distintos tempos, las interpretaciones no son versiones de distinta duración las unas de las otras (como si la misma interpretación se tocara con distintas velocidades). Con los cambios de tempo se producen variaciones de expresión musical (Desain y Honing 1993). Estas variaciones no solo afectan la cadencia de las notas, también pueden suponer, por ejemplo, el añadido o la supresión de ornamentaciones o la consolidación/fragmentación de notas. Aparte del tempo, hay otros factores de dominio específico que parecen desempeñar un papel importante en la manera de interpretar una melodía, por ejemplo, la métrica y estructura de las frases. La transformación del tempo es una de las tareas de procesamiento posterior que se hacen de forma manual en los laboratorios de música. Automatizar este proceso puede ser, por tanto, de interés comercial.

Otras aplicaciones del razonamiento basado en casos para la música expresiva son las de Suzuki *et al.* (1999) y las de Toboudic y Widmer (2003, 2004). Suzuki *et al.* (1999) usan ejemplos de casos de interpretaciones expresivas para generar interpretaciones múltiples de una pieza dada con variada expresión musical, sin embargo manejan únicamente dos parámetros expresivos. Toboudic y Windmer (2003) aplican aprendizaje basado en ejemplos también para abordar el problema de generar interpretaciones expresivas. Su enfoque se usa para complementar un modelo basado en reglas en notas con cierta capacidad predictiva en fraseo musical. Más concretamente, el componente de aprendizaje basado en casos reconoce patrones de interpretación de un concertista de piano a nivel de frase y aprende cómo aplicarlos a nuevas piezas por analogía. Este enfoque ha generado algunos resultados interesantes pero, tal y como reconocen los autores, no fue convincente debido a la limitación que supone usar una representación de las frases del tipo atributo-valor. Una representación tan simple no puede tener en cuenta información estructural relevante de la pieza, tanto en el ámbito de subfrase como de interfrase. En un artículo posterior, Toboudic y Widmer (2003) lograron salvar en parte estas limitaciones utilizando una representación de frases relacional.

Widmer *et al.* (2009) describen un programa informático que aprende a interpretar música de piano clásica de manera expresiva. El enfoque es de uso intensivo de datos y está basado en el aprendizaje estadístico. Interpretar música de manera expresiva requiere sin duda un alto grado de creatividad, pero los autores adoptan una postura muy pragmática ante la cuestión de si se puede afirmar que su programa es o no creativo y afirman que «la creatividad está en el ojo del espectador». De hecho, el objetivo principal de los autores es investigar y entender mejor la interpretación musical como comportamiento creativo humano usando métodos de inteligencia artificial.

La posibilidad de que un ordenador interprete de manera expresiva es un componente fundamental de los llamados *hiperinstrumentos*. Son instrumentos diseñados para aumentar el sonido musical con unos matices idiosincráticos que le den expresividad humana y una sonoridad rica y viva. Para hacer un hiperinstrumento, se coge un instrumento tradicional, como por ejemplo un chelo, y se conecta a un ordenador mediante sensores electrónicos en el mástil y el arco, se equipa con sensores también la mano que sostiene el arco y se programa





«El hombre proyecta sobre los objetos automatizados la autonomía de su conciencia, su poder de control, su individualidad propia, la idea de su persona.»

JEAN BAUDRILLARD (1929-2007)
Filósofo y sociólogo francés. *El sistema de los objetos* (1969)

Ryoji Ikeda
Sound Installation (2009)
Cinco dispositivos Meyer SB-1s
12 x 6 x 24 m
Museo de Arte Contemporáneo de Tokio

el ordenador con un sistema parecido a SaxEx, que consigue analizar la manera en que el humano interpreta la pieza a partir de la partitura, el conocimiento musical y las lecturas de los sensores. Los resultados de este análisis permiten al hiperinstrumento desempeñar un papel activo, alterando aspectos como el timbre, el tono, el ritmo y el fraseo, así como generar una voz acompañante. En otras palabras, se obtiene un instrumento capaz de hacerse su propio acompañamiento. Tod Machover, del Media Lab del Massachusetts Institute of Technology, desarrolló un hiperchelo y el gran chelista Yo-Yo Ma lo estrenó tocando una pieza compuesta por Tod Machover titulada *Begin Again Again* (Volver a empezar otra vez) en el festival Tanglewood hace varios años.

Improvisar música

La improvisación musical es un proceso creativo muy complejo que también ha sido simulado informáticamente. A menudo se denomina «composición sobre la marcha» y es, por tanto, desde el punto de vista creativo, más compleja que la composición y probablemente la más complicada de las tres actividades musicales examinadas aquí. Uno de los primeros trabajos sobre improvisación de los ordenadores es el sistema Flavors Band, de Fry (1984). Flavors Band es un lenguaje procedimental embebido en LISP que sirve para especificar estilos de *jazz* y de música popular. Su representación procedimental permite generar partituras en un estilo preespecificado haciendo cambios en las acotaciones de la partitura de entrada. Permite combinar funciones aleatorias y restricciones musicales (acordes, modos, etcétera) para generar improvisaciones. El resultado más notable de Flavors Band fue un interesante arreglo de la línea de bajo y un solo improvisado de la composición de John Coltrane *Giant Steps*.

GenJam (1994) desarrolla una simulación de músico de *jazz* aprendiendo a improvisar mediante un algoritmo genético. Un humano hace el papel de función de aptitud evaluando las improvisaciones del músico simulado. Papadopoulos y Wiggins (1998) también usaron un algoritmo genético para improvisar melodías de *jazz* a partir de una progresión de acordes dada. Al contrario de GenJam, su programa incluye una función de aptitud que evalúa de manera automática la calidad de las improvisaciones teniendo en cuenta ocho aspectos distintos de la melodía improvisada, entre ellos, contorno melódico, duración de las notas o distancias interválicas entre notas.

Franklin (2001) emplea redes de neuronas artificiales recurrentes para aprender a improvisar solos de *jazz* a partir de transcripciones de improvisaciones de solos de *jazz* del saxofonista Sonny Rollins. Se usa un algoritmo de aprendizaje reforzado para afinar el comportamiento de las redes neuronales. La función de recompensa evalúa los solos creados por el sistema siguiendo criterios de armonía jazzística y en relación al estilo de Rollins.

La falta de interactividad con un improvisador humano presente en los enfoques anteriores ha sido criticada (Thom 2001) con el argumento de que eliminan al músico de la creación física y espontánea de la melodía. Aunque es cierto que la característica fundamental de la improvisación es la creación espontánea y a tiempo real de una melodía, no lo es menos que la interactividad no era uno de los objetivos de estos enfoques, y aun así consiguieron generar improvisaciones muy interesantes. Thom (2001), con su sistema Band-out-of-a-Box (BoB), aborda el problema de improvisación interactiva a tiempo real entre BoB y un intérprete humano. En otras palabras, BoB es un «músico acompañante» para improvisación a tiempo real. El enfoque de Thom sigue la teoría psicológica de improvisación en *jazz* de



Johnson-Laird (1991). Esta teoría se opone a la opinión según la cual improvisar consiste en reordenar y transformar *licks* prememorizados dentro de las restricciones de la armonía. En lugar de ello, propone un modelo estocástico basado en un algoritmo voraz en un espacio restringido de notas posibles de interpretar en un momento de tiempo determinado. La gran contribución de Thom es que su sistema aprende estas restricciones, y con ellas el modelo estocástico, del intérprete humano mediante un algoritmo de agrupamiento probabilístico no supervisado. El modelo aprendido se usa para extraer solos y convertirlos en modos de interpretar específicos para cada usuario. Los parámetros de ese modelo aprendido se incorporan a continuación al proceso estocástico, que genera los solos en respuesta a solos de cuatro compases del improvisador humano. BoB ha sido muy bien valorado, una vez puestos a prueba sus acompañamientos de solos en dos estilos diferentes, el del saxofonista Charlie Parker y el del violinista Stéphane Grapelli.

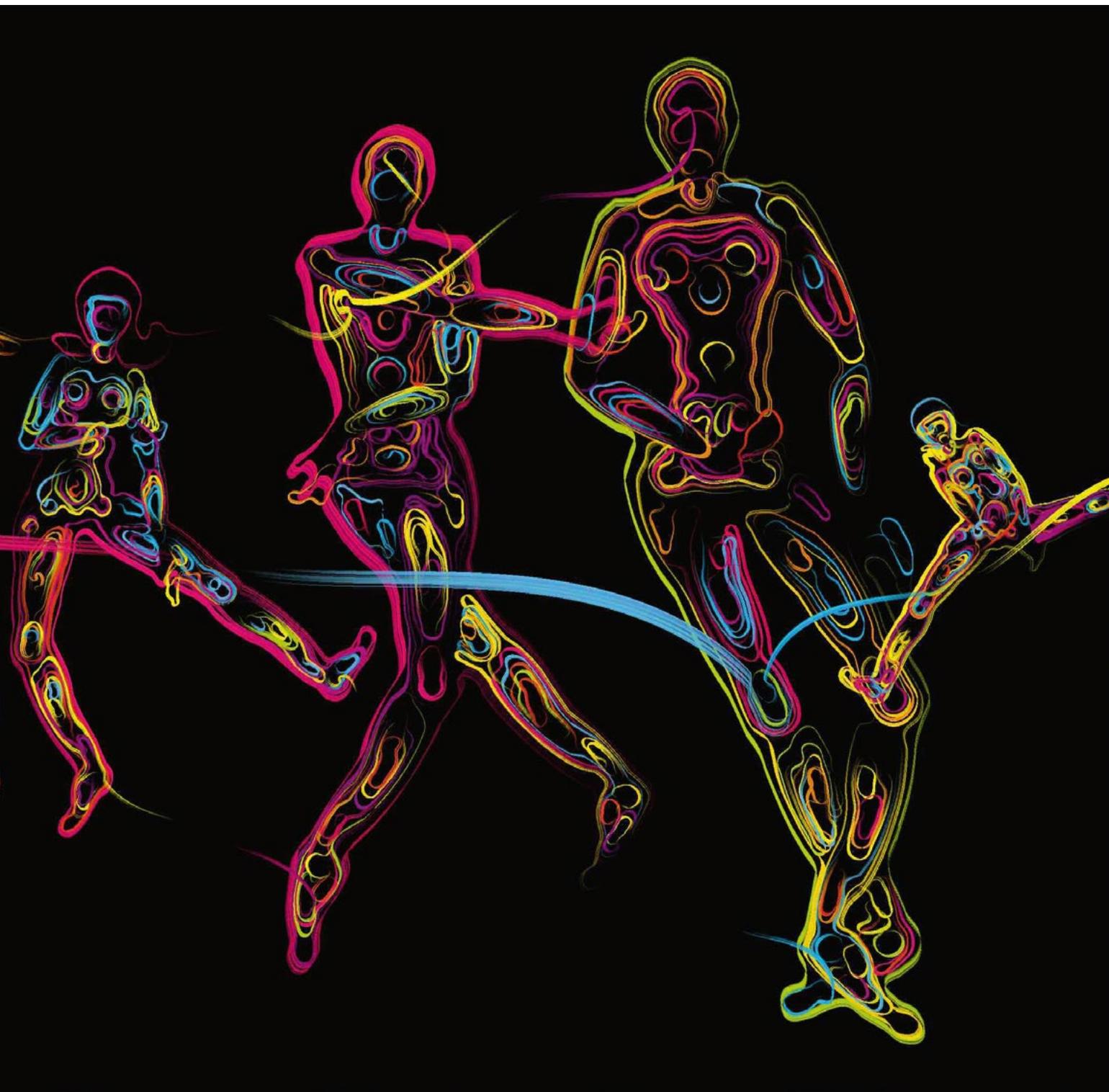
Dannenbergh (1993) desarrolló un notable sistema de improvisación interactiva. La diferencia respecto al de Thom es que en el sistema de Dannenberg la generación de música viene impulsada principalmente por los objetivos del compositor, en lugar de los del intérprete. El sistema de improvisación de Wessel (1998) está más cerca del de Thom en el sentido de que también da importancia al acompañamiento y realce de las improvisaciones en directo.

CREATIVIDAD COMPUTACIONAL EN LAS ARTES VISUALES

AARON es un sistema robótico, desarrollado a lo largo de muchos años por el artista y programador Harold Cohen (1995), capaz de coger un pincel con su brazo robótico y pintar en un lienzo sin ayuda. Pinta personas en un jardín botánico no solo copiando un dibujo existente, sino generando tantos dibujos únicos sobre este tema como sean necesarios. AARON nunca ha visto a una persona paseando por un jardín botánico, pero se le han proporcionado conocimientos sobre posturas corporales y plantas mediante reglas. Los conocimientos de AARON y la manera en que los usa no son como el conocimiento que nosotros, los humanos, tenemos y usamos, porque el conocimiento humano se basa en experimentar el mundo, y las personas experimentan el mundo con sus cuerpos, sus cerebros, sus sistemas reproductivos, cosas que no tienen los ordenadores.

Sin embargo, al igual que ocurre con los humanos, los conocimientos de AARON han sido adquiridos de forma acumulativa. Una vez que entiende el concepto de racimo de hojas, por ejemplo, puede hacer uso de ese conocimiento siempre que lo necesite. Para AARON, las plantas existen en términos de tamaño, grosor de las ramas en relación a la altura, el ritmo al que las ramas adelgazan a medida que crecen, el grado de ramificación, el ángulo al que brotan las ramas, etcétera. Los mismos principios sirven para la formación de hojas y de racimos. Manipulando estos factores, AARON es capaz de generar un amplio espectro de tipos de plantas y nunca dibujará la misma planta dos veces, ni siquiera cuando dibuje una serie de plantas de la misma especie. Además, AARON debe saber en qué consiste el cuerpo humano, cuáles son sus diferentes partes y su tamaño en relación con las otras. También tiene que saber cómo se articulan las partes del cuerpo y cuáles son las clases y rango de movilidad de cada articulación. Por último, y puesto que un cuerpo que se mueve de forma





coherente y no es una mera colección de partes que se mueven independientemente, AARON necesita saber algo sobre cómo se coordinan los movimientos corporales; por ejemplo, lo que tiene que hacer el cuerpo para mantener el equilibrio.

Conceptualmente esto no es tan difícil como podría parecer, al menos para posturas erguidas con un pie o dos pies en el suelo. Es solo cuestión de mantener el centro de gravedad sobre la base y, cuando sea necesario, usar los brazos para recuperar una postura de equilibrio. También posee conocimientos sobre obliteración, de forma que un cuerpo humano parcialmente tapado puede tener, por ejemplo, solo un brazo y/o una pierna visibles, pero AARON sabe que las personas suelen tener dos brazos y dos piernas y, por eso, cuando no las tapa algo siempre dibujará dos extremidades de cada. Esto significa que AARON no puede «violiar» reglas y nunca «imaginará» la posibilidad de dibujar humanos con una sola pierna, por ejemplo, u otras formas de abstracción. En consecuencia, la creatividad de AARON es muy limitada y está muy lejos de la humana. No obstante, sus pinturas han sido expuestas en la Tate Modern de Londres y el Museo de Arte Moderno de San Francisco. En determinados sentidos, por tanto, AARON supera una suerte de test de Turing de creatividad, puesto que sus obras tienen calidad para ser expuestas junto con las de algunos de los mejores artistas humanos.

The Painting Fool, de Simon Colton (Colton *et al.* 2015), es mucho más autónomo que AARON. Aunque el *software* no aplica pintura físicamente en un lienzo, simula digitalmente numerosos estilos, desde el *collage* a las pinceladas. En palabras de Colton:

The Painting Fool precisa solo instrucciones mínimas y puede producir sus propios conceptos buscando material en línea. El *software* realiza sus propias búsquedas y se desplaza por sitios web de medios sociales. La idea es que este enfoque le permita producir un arte que comunique algo al espectador porque esencialmente está dibujando sobre experiencias humanas, sobre cómo actuamos, nos sentimos y discutimos en la web.

Por ejemplo, en 2009, The Painting Fool produjo su propia interpretación de la guerra en Afganistán a partir de una historia en los periódicos. El resultado es una yuxtaposición de ciudadanos afganos, explosiones y tumbas de víctimas de la guerra.

Otros ejemplos de creatividad computacional aplicada a la pintura y a otras artes visuales son los trabajos de Karl Sims y Jon McCormack. «Reaction Diffusion Media Wall» (Muro de medios reacción-difusión) (Sims 2016) se basa en la simulación interactiva de agentes químicos que reaccionan y se difunden para crear patrones dinámicos emergentes de acuerdo a las ecuaciones de reacción-difusión que gobiernan la morfogénesis biológica. Este trabajo está expuesto en el Museo de las Ciencias de Boston. Trabajos anteriores de Karl Sims incluyen la aplicación de técnicas informáticas avanzadas para desarrollar imágenes de forma interactiva con su sistema Genetics Images (Sims 1994).

Jon McCormack también explora cómo podrían aplicarse con éxito los procesos biológicos en su proyecto «Design After Nature» (Diseñar a partir de la naturaleza) (McCormack 2014). En otro proyecto, Creative Ecosystems, examina conceptos y metáforas de ecosistemas biológicos (McCormack y D'Inverno 2012) como medio de realzar la creatividad humana en las artes digitales.





Hay muchos más ejemplos relacionados con las artes visuales. Los mencionados aquí no son solo un conjunto representativo sino, en mi opinión, también las contribuciones más importantes en su campo.

APOYAR Y AUMENTAR LA CREATIVIDAD HUMANA O LA DEMOCRATIZACIÓN DE LA CREATIVIDAD

¿Podemos usar la inteligencia artificial para apoyar la creatividad y los descubrimientos humanos? Una nueva tendencia conocida como *creación asistida* tiene consecuencias importantes en la creatividad. Por una parte, plataformas colaborativas como la desarrollada en el marco del proyecto europeo PRAISE para aprender música (Yee-king y D’Inverno 2014) facilitan la adquisición de nuevas destrezas creativas. PRAISE es una plataforma de aprendizaje basada en redes sociales que incluye humanos y agentes de *software* inteligente que proporcionan *feedback* a un estudiante de música sobre composición, arreglos e interpretación. Los estudiantes suben sus soluciones a una unidad didáctica proporcionada por un tutor (sobre composiciones, arreglos o interpretaciones). A continuación, los agentes de *software*, así como compañeros estudiantes y tutores, analizan esas soluciones y proporcionan *feedback*. Por ejemplo, en el caso de una composición musical, el agente puede decir: «Tu modulación suena muy bien, pero podrías tratar de subir una tercera mayor en los compases del 5 al 8».

En el caso de interpretaciones, otros agentes de *software* inteligente comparan las de los estudiantes con una previamente grabada por el tutor cuando subió la unidad didáctica a la plataforma. Una cámara captura los movimientos del estudiante y los agentes de *software* también proporcionan *feedback* sobre posibles posturas incorrectas. Esta clase de herramientas que aceleran el tiempo de adquisición de destrezas conducen a un fenómeno llamado «democratización de la creatividad».

Ya en 1962, Douglas Engelbart (Engelbart 1962) escribió sobre una «máquina de escribir que permitiría usar un nuevo procedimiento de escritura de textos [...] Permite integrar las ideas con mayor facilidad y por tanto reconducir la creatividad de manera más continua». Engelbart estaba prediciendo no solo la creatividad individual aumentada, también quería aumentar la inteligencia colectiva y la creatividad de grupos mejorando la colaboración y la capacidad de resolución de problemas en grupo.

Una idea básica es que la creatividad es un proceso social que puede aumentarse mediante tecnología. Al proyectar estas ideas hacia el futuro, podríamos imaginar un mundo donde la creatividad es altamente accesible y (casi) cualquier persona puede

escribir como los grandes escritores, pintar como los grandes maestros, componer música de alta calidad e incluso descubrir nuevas formas de expresión creativa. Para alguien que no tenga una destreza creativa especial, adquirirla mediante sistemas de creación asistida supone un empoderamiento importante.

Aunque este escenario futurista es aún ficción pura, ya existen varios ejemplos de creación asistida. Uno de los más interesantes es el sistema de percusión asistida desarrollado por el Georgia Institute of Technology (Bretan y Weinberg 2016). Consiste en un brazo robótico que permite a los bateristas tocar con tres manos. El «brazo inteligente», de 61 centímetros de largo, puede fijarse al hombro de un músico. Responde a gestos humanos y a la música que oye. Cuando el baterista toca el charles, por ejemplo, el brazo robótico toca los platillos. Cuando el percusionista se pasa al tambor, el brazo mecánico cambia al tomtom.

Otro resultado de gran interés en creatividad asistida es la transferencia de estilo musical y armonía, de género a género, desarrollado en el SONY Computer Lab en París (Martín *et al.* 2015; Papadopoulos *et al.* 2016), que ayuda a compositores a armonizar una pieza musical en un género determinado de acuerdo al estilo de otro completamente distinto. Por ejemplo, a armonizar un estándar de jazz al estilo de Mozart.

CONCLUSIONES: ¿CREATIVIDAD APARENTE O REAL?

Margaret Boden señaló que incluso si un ordenador inteligente artificialmente llegara a ser tan creativo como Bach o Einstein, para muchos sería solo creativo en apariencia y no en realidad. Coincido plenamente con ella en las dos razones que da para este rechazo, a saber: la falta de intencionalidad y nuestra renuencia a dar cabida en nuestra sociedad a agentes artificialmente inteligentes. La falta de intencionalidad es consecuencia directa del argumento de la habitación china (Searle 1980), según el cual los programas informáticos solo pueden realizar manipulación sintáctica de símbolos, pero son incapaces de dotarlos de contenido semántico. Por lo general, se admite que la intencionalidad puede explicarse en términos de relaciones causales. Sin embargo, también es cierto que los programas informáticos existentes carecen de las conexiones causales relevantes necesarias para mostrar intencionalidad, pero tal vez inteligencias artificiales futuras, posiblemente antropomórficas, «encarnadas», es decir, agentes equipados no solo con *software* avanzado, sino también con distintas clases de sensores complejos que les permitirán interactuar con





el entorno, puedan contener conexiones causales suficientes para dotar de significado a símbolos y tener intencionalidad.

Respecto al rechazo social, las razones de que seamos tan reacios a aceptar que agentes no biológicos (o incluso biológicos, como en el caso de Nonja, un pintor vienés de veinte años cuyos cuadros abstractos fueron expuestos y admirados en galerías de arte, pero cuya obra se devaluó después de saberse que era un orangután del zoo de Viena) puedan ser creativos es que no tienen cabida natural en nuestra sociedad de seres humanos y la decisión de aceptarlos tendría consecuencias sociales de gran calado. Por tanto, es mucho más fácil decir que parecen ser inteligentes, creativos, etcétera, en lugar de decir que lo son. En una palabra, es un problema moral, no científico. Una tercera razón para rechazar la creatividad de los programas informáticos es que no son conscientes de sus logros. Es cierto que las máquinas no tienen conciencia, y posiblemente nunca tendrán pensamiento consciente, pero la falta de conciencia no es una razón fundamental para negar el potencial para la creatividad, ni siquiera la inteligencia. Después de todo, los ordenadores no serían los primeros creadores inconscientes, la evolución es el primer ejemplo, tal como señala brillantemente Stephen J. Gould (1996): «Si la creación exige un creador visionario, entonces ¿cómo logra la evolución ciega construir cosas nuevas tan espléndidas como nosotros mismos?».

NOTA DEL AUTOR

Esta investigación ha sido subvencionada en parte por la beca 2014-SGR-118 de la Generalitat de Catalunya.



BIBLIOGRAFÍA

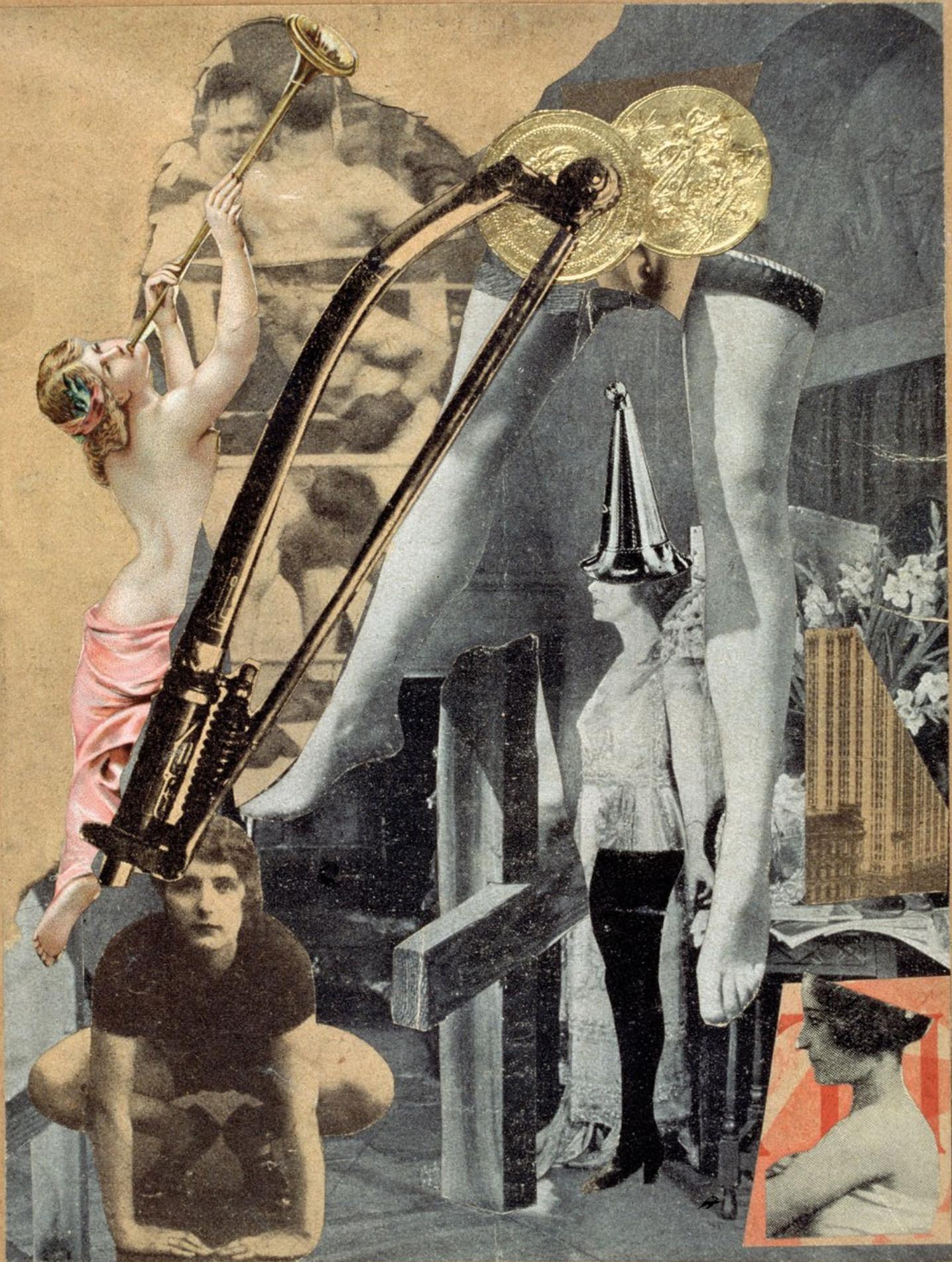
- Arcos, J. L. y López de Mántaras, R., «An Interactive Case-Based Reasoning Approach for Generating Expressive Music», en *Applied Intelligence*, vol. 14, n.º 1, 2001, pp. 115-129.
- Arcos, J. L., López de Mántaras, R. y Serra, X., «SaxEx: A Case-Based Reasoning System for Generating Expressive Musical Performances», en *Journal of New Music Research*, vol. 27, n.º 3, 1998, pp. 194-210.
- Bentley, P. J. y Corne, D. W. (eds.), *Creative Evolutionary Systems*, Burlington, Massachusetts, Morgan Kaufmann, 2001.
- Bharucha, J., «MUSACT: A Connectionist Model of Musical Harmony», en Schwanauer, S. M. y Levitt, D. A. (eds.), *Machine Models of Music*, Cambridge, Massachusetts, The MIT Press, 1993, pp. 497-509.
- Biles, J. A., «GenJam: A Genetic Algorithm for Generating Jazz Solos», en *Proceedings of the 1994 International Computer Music Conference*, San Francisco, California, International Computer Music Association, 1994.
- Boden, M., *The Creative Mind: Myths and Mechanisms*, Nueva York, Basic Books, 1991.
- Boden, M. (ed.), *Dimensions of Creativity*, Cambridge, Massachusetts, The MIT Press, 1994.
- Boden, M., «Computers Models of Creativity», en *AI Magazine*, vol. 30, n.º 3, 2009, pp. 23-34.
- Bresin, R., «Artificial Neural Networks Based Models for Automatic Performance of Musical Scores», en *Journal of New Music Research*, vol. 27, n.º 3, 1998, pp. 239-270.
- Bresin, R., «Articulation Rules for Automatic Music Performance», en *Proceedings of the 2001 International Computer Music Conference*, San Francisco, California, International Computer Music Association, 2001.
- Bretan, M. y Weinberg, G., «A Survey of Robotic Musicianship», en *Communications of the ACM*, vol. 59, n.º 5, 2016, pp. 100-109.
- Canazza, S., De Poli, G., Roda, A. y Vidolin, A., «Analysis and Synthesis of Expressive Intention in a Clarinet Performance», en *Proceedings of the 1997 International Computer Music Conference*, San Francisco, California, International Computer Music Association, 1997, pp. 113-120.
- Cohen, H., «The Further Exploits of Aaron, Painter», en *Stanford Humanities Review*, vol. 4, n.º 2, 1995, pp. 141-158.
- Colton, S., López de Mántaras, R. y Stock, O., «Computational Creativity: Coming of Age», en *AI Magazine* (número especial), vol. 30, n.º 3, 2009, pp. 11-14.
- Colton, S., Halskov, J., Ventura, D., Gouldstone, I., Cook, M. y Pérez-Ferrer, B., «The Painting Fool Sees! New Projects with the Automated Painter», en *Congreso internacional sobre creatividad computacional*, 2015, pp. 189-196.
- Cope, D., «Experiments in Music Intelligence», en *Proceedings of the 1987 International Computer Music Conference*, San Francisco, California, International Computer Music Association, 1987.
- Cope, D., «Pattern Matching as an Engine for the Computer Simulation of Musical Style», en *Proceedings of the 1990 International Computer Music Conference*, San Francisco, California, International Computer Music Association, 1990.
- Dannenberg, R. B., «Software Design for Interactive Multimedia Performance», en *Interface*, vol. 22, n.º 3, 1993, pp. 213-218.
- Dannenberg, R. B. y Derenyi, I., «Combining instrument and performance models for high quality music synthesis», en *Journal of New Music Research*, vol. 27, n.º 3, 1998, pp. 211-238.
- Dartnall, T. (ed.), *Artificial Intelligence and Creativity*, Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 1994.
- Desain, P. y Honing, H., «Tempo Curves Considered Harmful», en Kramer, J. D. (ed.), *Time in Contemporary Musical Thought*, en *Contemporary Music Review*, vol. 7, n.º 2, 1993.
- Ebcioğlu, K., «An Expert System for Harmonizing Four-part Chorales», en Schwanauer, S. M. y Levitt, D. A. (eds.), en *Machine Models of Music*, Cambridge, Massachusetts, The MIT Press, 1993, pp. 385-401.
- Engelbart, D. C., *Augmenting human intellect: A Conceptual Framework*, Menlo Park, Stanford Research Institute, octubre de 1962, p. 5.
- Feulner, J., «Neural Networks that Learn and Reproduce Various Styles of Harmonization», en *Proceedings of the 1993 International Computer Music Conference*, San Francisco, California, International Computer Music Association, 1993.
- Fletcher, P., Haswell, S., Watts, P. y Zhang, X., «Lab-on-a-Chip Micro Reactors for Chemical Synthesis», en *Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology*, 2001.
- Franklin, J. A., «Multi-phase Learning for Jazz Improvisation and Interaction», en *Proceedings of the Eight Biennial Symposium on Art and Technology*, New London, Connecticut, College Center for Arts and Technology, 2001.
- Friberg, A. A., «Quantitative Rule System for Musical Performance» (tesis doctoral inédita), Estocolmo, KTH, 1995.
- Friberg, A., Bresin, R., Fryden, L. y Sunberg, J., «Musical Punctuation on the Microlevel: Automatic Identification and Performance of Small Melodic Units», en *Journal of New Music Research*, vol. 27, n.º 3, 1998, pp. 271-292.
- Friberg, A., Sunberg, J. y Fryden, L., «Music From Motion: Sound Level Envelopes of Tones Expressing Human Locomotion», en *Journal on New Music Research*, vol. 29, n.º 3, 2000, pp. 199-210.
- Fry, C., «Flavors Band: A Language for Specifying Musical Style», 1984. Reeditado en Schwanauer, S. M. y Levitt, D. A. (eds.), *Machine Models of Music*, Cambridge, Massachusetts, The MIT Press, 1993, pp. 427-451.
- Gervás, P., «Computational Approaches to Storytelling and Creativity», en *AI Magazine*, vol. 30, n.º 3, 2009, pp. 49-62.



- Grachten, M., Arcos, J. L. y López de Mántaras, R., «TempoExpress, a CBR Approach to Musical Tempo Transformations», en Funk, P. y González Calero, P. A. (eds.), *Actas del VII Congreso Europeo sobre razonamiento Basado en Casos, en Lecture Notes in Artificial Intelligence*, vol. 3.155, 2004, pp. 601-615.
- Gould, S. J., «Creating the Creators», en *Discover Magazine*, octubre de 1996, pp. 42-54.
- Hiller, L. y Isaacson, L., «Musical Composition with a High-speed Digital Computer», 1958. Reeditado en Schwanauer, S. M. y Levitt, D. A. (eds.), *Machine Models of Music*, Cambridge, Massachusetts, The MIT Press, 1993, pp. 9-21.
- Holmes, B., «Steve Thaler's "Creativity Machine"», en *New Scientist*, vol. 2.013, 1996, pp. 22-24.
- Hörnel, D. y Degenhardt, P., «A Neural Organist Improvising Baroque-style Melodic Variations», en *Proceedings of the 1997 International Computer Music Conference*, San Francisco, California, International Computer Music Association, 1997, pp. 430-433.
- Hörnel, D. y Menzel, W., «Learning Musical Structure and Style with Neural Networks», en *Journal on New Music Research*, vol. 22, n.º 4, 1998, pp. 44-62.
- Johnson, M. L., «An Expert System for the Articulation of Bach Fugue Melodies», en Baggi, D. L. (ed.), *Readings in Computer Generated Music*, Los Alamitos, California, IEEE Press, 1992, pp. 41-51.
- Johnson-Laird, P. N., «Jazz Improvisation: A Theory at the Computational Level», en Howell, P., Wessst, R. y Cross, I. (eds.), *Representing Musical Structure*, Londres y San Diego, Academic Press, 1991.
- Kendall, R. A. y Carterette, E. C., «The Communication of Musical Expression», en *Music Perception*, vol. 8, n.º 2, 1990, p. 129.
- Langley, P., Simon, H. A., Bradshaw, G. L. y Zytkow, J. M., *Scientific Discovery, Computational Explorations of the Creative Mind*, Cambridge, Massachusetts, The MIT Press, 1987.
- Lerdahl, F., y Jackendoff, R., «An Overview of Hierarchical Structure in Music», en *Music Perception*, vol. 1, 1983, pp. 229-252.
- Levitt, D. A., «A Representation for Musical Dialects», en Schwanauer, S. M. y Levitt, D. A. (eds.), en *Machine Models of Music*, Cambridge, Massachusetts, The MIT Press, 1993, pp. 455-469.
- López de Mántaras, R. y Arcos, J. L., «AI and Music: From Composition to Expressive Performance», en *AI Magazine*, vol. 23, n.º 3, 2002, pp. 43-57.
- López de Mántaras, R. y Arcos, J. L., «Playing with Cases: Rendering Expressive Music with Case-Based Reasoning», en *AI Magazine*, vol. 33, n.º 4, 2012, pp. 22-31.
- Martín, D., Frantz, B. y Pachet, F., «Improving Music Composition through Peer Feedback: Experiment and Preliminary Results», en Steels, L. (ed.), *Music Learning with Massive Open Online Courses (MOOCs)*, Ámsterdam, IOS Press, 2015, pp. 195-204.
- McCormack, J. y D'Inverno, M., *Computers and Creativity*, Heidelberg, Springer, 2012.
- McCormack, J., «Balancing Act: Variation and Utility in Evolutionary Art», en *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 8.601, 2014, pp. 26-37.
- Minsky, M., «Music, Mind, and Meaning», 1981. Reeditado en Schwanauer, S. M. y Levitt, D. A. (eds.), *Machine Models of Music*, Cambridge, Massachusetts, The MIT Press, 1993, pp. 327-354.
- Montfort, N., Baudoin, P., Bell, J., Bogost, I., Douglass, J., Marino, M. C., Mateas, M., Reas, C., Sample M. y Vawter, N., *10PRINT CHR\$(205.5+RND(1)); GOTO 10*, Cambridge, Massachusetts, The MIT Press, 2014.
- Moorer, J. A., «Music and Computer Composition», 1972. Reeditado en Schwanauer, S. M. y Levitt, D. A. (eds.), *Machine Models of Music*, Cambridge, Massachusetts, The MIT Press, 1993, pp. 167-186.
- Morales-Manzanares, R., Morales, E. F., Dannenberg, R. y Berger, J., «SICIB: An Interactive Music Composition System Using Body Movements», en *Computer Music Journal*, vol. 25, n.º 2, 2001, pp. 25-36.
- Pachet, F. y Roy, P., «Formulating Constraint Satisfaction Problems on Part-whole Relations: The Case of Automatic Harmonization», en ECAI'98 Workshop on Constraint Techniques for Artistic Applications, Brighton, Reino Unido, 1998.
- Papadopoulos, G. y Wiggins, G., «A Genetic Algorithm for the Generation of Jazz Melodies», en *Proceedings of the SteP'98 Conference*, Finlandia, 1998.
- Papadopoulos, A., Roy, P. y Pachet, F., «Assisted Lead Sheet Composition using FlowComposer», *Actas del XXII Congreso Internacional sobre Principios y Práctica de la Programación con Restricciones*, Toulouse, 2016.
- Partridge, D. y Rowe, J., *Computers and Creativity*, Bristol, Intellect Books, 1994.
- Rader, G. M., «A Method for Composing Simple Traditional Music by Computer», 1974. Reeditado en Schwanauer, S. M. y Levitt, D. A. (eds.), *Machine Models of Music*, Cambridge, Massachusetts, The MIT Press, 1993, pp. 243-260.
- Ritchie, G. D. y Hanna, F. K., «AM: A Case Study in AI Methodology», en *Artificial Intelligence*, vol. 23, 1983, pp. 249-268.
- Ritchie, G. D., «Can Computers Create Humour», *AI Magazine*, vol. 30, n.º 3, 2009, pp. 71-81.
- Rothgeb, J., «Simulating Musical Skills by Digital Computer», 1969. Reeditado en Schwanauer, S. M. y Levitt, D. A. (eds.), *Machine Models of Music*, Cambridge, Massachusetts, The MIT Press, 1993, pp. 157-164.
- Rowe, J. y Partridge, D., «Creativity: A Survey of AI Approaches», en *Artificial Intelligence Review*, vol. 7, 1993, pp. 43-70.
- Sabater, J., Arcos, J. L. y López de Mántaras, R., «Using Rules to Support Case-Based Reasoning for Harmonizing Melodies», en *AAAI Spring Symposium on Multimodal Reasoning*, Menlo Park, California, American Association for Artificial Intelligence, 1998, pp. 147-151.
- Schwanauer, S. M., «A Learning Machine for Tonal Composition», 1993. Reeditado en Schwanauer, S. M. y Levitt, D. A. (eds.), *Machine Models of Music*, Cambridge, Massachusetts, The MIT Press, 1993, pp. 511-532.



- Schwanauer, S. M. y Levitt, D. A. (eds.), *Machine Models of Music*, Cambridge, Massachusetts, The MIT Press, 1993, p. 21.
- Searle, J. «Minds, Brains and Programs», en *Behavioral and Brain Sciences*, vol. 3, n.º 3, 1980, pp. 417-457.
- Simon, H. A. y Sumner, R. K., «Patterns in Music», 1968. Reeditado en Schwanauer, S. M. y Levitt, D. A. (eds.), *Machine Models of Music*, Cambridge, Massachusetts, The MIT Press, 1993, pp. 83-110.
- Sims, K., «Evolving Virtual Creatures. Computer Graphics», en *SIGGRAPH 94 21st International ACM Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, Nueva York, ACM, 1994, pp. 15-22.
- Sims, K., «Reaction-diffusion Media Wall», 2016, <http://www.karlsims.com/rd-exhibit.html>
- Suzuki, T., Tokunaga, T. y Tanaka, H., «A Case-Based Approach to the Generation of Musical Expression», en *Proceedings of the 16th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, Burlington, Massachusetts, Morgan Kaufmann, 1999, pp. 642-648.
- Thom, B., «BoB: An Improvisational Music Companion» (tesis doctoral inédita), Pittsburgh, Pensilvania, School of Computer Science, Universidad de Carnegie-Mellon, 2001.
- Tobudic, A. y Widmer, G., «Playing Mozart Phrase by Phrase», en Ashley, K. D. y Bridge, D. G. (eds.), *Actas del V Congreso Internacional sobre Razonamiento Basado en Casos*, en *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, Heidelberg, Springer, vol. 3.155, 2003, pp. 552-566.
- Tobudic, A. y Widmer, G., «Case-Based Relational Learning of Expressive Phrasing in Classical Music», en Funk P. y González Calero, P. A. (eds.), *Actas del VII Congreso Europeo sobre Razonamiento Basado en Casos*, en *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, Heidelberg, Springer, vol. 3.155, 2004, pp. 419-433.
- Turing, A. M., «Computing Machinery and Intelligence», en *Mind*, vol. LIX, n.º 236, 1950, pp. 433-460.
- Wessel, D., Wright, M. y Kahn, S. A., «Preparation for Improvised Performance in Collaboration with a Khyal Singer», en *Proceedings of the 1998 International Computer Music Conference*, San Francisco, California, International Computer Music Association, 1998.
- Widmer, G., Flossmann, S., Grachten, M., «YQX Plays Chopin», en *AI Magazine*, vol. 30, n.º 3, 2009, pp. 35-48.
- Woods, W., «Transition Network Grammars for Natural Language Analysis», en *Communications of the ACM*, vol. 13, n.º 10, 1970, pp. 591-606.
- Yee-King, M. y D'Inverno, M., «Pedagogical Agents for Social Music Learning in Crowd-based Socio-cognitive Systems», en *Proceedings First International Workshop on the Multiagent Foundations of Social Computing*, AAMAS-2014, Paris, 2014.



Hannah Höch

El papel del artista en la evolución de la realidad aumentada

HELEN PAPAGIANNIS

Imagen de apertura:
Hannah Höch (1889–1978)
Dada Ernst (1920-1921)
Collage sobre papel
18,6 x 16,6 cm
The Israel Museum, Jerusalén, Israel
Vera & Arturo Schwarz Collection of
Dada and Surrealist Art



Helen Papagiannis

Artista, escritora e investigadora de nuevos medios digitales

Helen Papagiannis lleva una década trabajando con realidad aumentada como investigadora, diseñadora y defensora de las tecnologías. Está considerada una de las cien personas NEXT más influyentes en medios digitales y su charla TEDx figura en la lista de las diez mejores charlas sobre realidad aumentada. Con anterioridad fue miembro del estudio de diseño de reconocido prestigio Bruce Mau, donde dirigió el proyecto «Massive Change: The Future of Global Design», una exposición internacional itinerante y un libro superventas. Es autora también de *Augmented Human: How Technology is Shaping the New Reality*, publicado por O'Reilly Media.

A menudo se excluye a los artistas del debate sobre la evolución de las nuevas tecnologías, a pesar de que son esenciales en la de determinados medios emergentes. Golan Levin señala que fueron los artistas quienes crearon los prototipos de muchas de las tecnologías actuales: «Si queremos dar el salto al futuro, debemos fijarnos en los artistas que trabajan con nuevas tecnologías». Este capítulo habla del importante papel de los artistas en la tecnología emergente de realidad aumentada (RA).

INTRODUCCIÓN

Por regla general, los artistas no desarrollan las tecnologías emergentes, sino que las adaptan a sus aplicaciones creativas y artísticas a partir de la ciencia y la ingeniería, así como de la industria. Esto plantea preguntas sobre acceso, conocimiento y comprensión de las posibilidades y limitaciones de la tecnología para darle usos artísticos y exige tanto imaginar nuevas aplicaciones y perspectivas como desarrollar estéticas y convenciones que vayan más allá de las formas tradicionales existentes.

En 1988, John Pearson escribió que los artistas se habían apropiado del ordenador, que brindaba «nuevos medios para expresar sus ideas».¹ Sin embargo nos aclara que, históricamente, las nuevas tecnologías «no han sido desarrolladas por la comunidad artística para sus fines estéticos, sino por la ciencia y la industria con el objeto de satisfacer las necesidades prácticas o utilitarias de la sociedad».² Es el artista quien debe decidir si quiere convertirse en un «colonizador» y «explotar» estas nuevas tecnologías para sus propios fines, algo que sostiene Roger Malina y sobre lo que volveré más adelante.³

Pearson afirma que «los nuevos conceptos que traen consigo nuevas imágenes y nuevos materiales suelen estar en conflicto con el modelo estético aceptado del *statu quo*, precisamente porque apenas existen criterios para valorarlos».⁴ Por tanto, la función del artista es actuar como un pionero, impulsando una nueva estética que explote los materiales únicos de la nueva tecnología y se enfrente a las tradiciones establecidas. Pearson sostiene que la imagen por ordenador presenta «tendencias estilísticas» concretas que «han sido determinadas por factores ajenos al arte».⁵ Sin embargo, señala, en la época en la que escribió el artículo (1988), que los artistas computacionales reproducen arte creado con formas tradicionales anteriores y «por tanto restringen el potencial de los ordenadores, al tratar de imponerles su voluntad historicista».⁶ Esto nos recuerda los conceptos de re-mediación de Jay David Bolter y Richard Grusin como reconfiguración del predecesor de un medio, y la idea de Marshall McLuhan, según la cual «nuestra respuesta típica a una nueva tecnología que nos





desconcierta es recrear el viejo entorno en lugar de prestar atención a las oportunidades del nuevo. Pasar por alto las nuevas oportunidades es no entender tampoco las nuevas fuerzas. Este error nos relega a meros autómatas».⁷

APROVECHAR LAS POSIBILIDADES ESPECÍFICAS DE LA RA Y SU VÍNCULO CON EL CINE EN SUS INICIOS

Para aprovechar las nuevas oportunidades que ofrece el arte computacional o cualquiera de los nuevos medios, hay que, como apunta Malina, «conocer las posibilidades específicas del ordenador y crear formas de arte que las exploten».⁸ Como artista que lleva trabajando con RA más de una década, hago mío el punto de vista de Malina. Para hacer avanzar la RA como un medio nuevo, es fundamental plantearse cuestiones como: «¿cuáles son las posibilidades específicas de la RA y cómo pueden orientarse para crear nuevas formas?», «¿qué diferencia la RA de medios anteriores y hacia qué nuevas convenciones evolucionará?». Es imperativo que exploremos y apliquemos estos atributos únicos para desarrollar el medio y «aprovechar las posibilidades del nuevo entorno».

Me gusta equiparar la RA en este momento al cine en sus inicios, cuando ni siquiera existían convenciones. La RA, al igual que el cine, nació centrada en la tecnología, dando muy poca importancia a los contenidos, considerados algo secundario. En un artículo donde compara el cine primitivo con el cine digital, John Andrew Berton Jr. destaca la aportación fundamental del cineasta francés Georges Méliès. Berton cita al historiador de cine Lewis Jacobs, que describía a Méliès como el «primero en explotar el medio como vehículo de expresión personal».⁹ Berton señala los progresos técnicos que Méliès aportó al medio (fundidos, encadenados y animaciones), e insiste en que «no se detenía en el puro éxito técnico», sino que «se afanaba por encontrar modos de utilizarlo para crear contenidos sustanciales».¹⁰

Berton continúa: «Aunque el trabajo de Méliès estuvo siempre en la vanguardia tecnológica, nunca permitió que este aspecto dominara la obra final. Usaba la tecnología para aumentar su sentido artístico, no para crearlo».¹¹ Méliès fue un artista entusiasmado por las posibilidades de la tecnología que permitía que el nuevo medio orientara sus exploraciones y su trabajo. Me sirve de inspiración en mi trabajo con RA, porque a Méliès la

tecnología le sugirió contenidos y orientaciones posibles de su obra, pero también le dio libertad para experimentar y creatividad para superar límites e inventar nuevas aplicaciones. Es más, Méliès introdujo nuevos estilos formales, nuevas convenciones y nuevas técnicas específicas para el cine. Al igual que Méliès trabajaba con un nuevo medio, los artistas pioneros de RA también evolucionarán hacia estilos inéditos y establecerán nuevas convenciones de lenguaje y estética para la RA.

Al trabajar con una nueva tecnología, un artista tiene también que trascender su fascinación inicial por la tecnología en sí, por eso Pearson avisa del peligro que supone para el artista «la magia de la máquina», y explica que hay pocos capaces de sobreponerse a su «fascinación hipnótica». ¹² Aquí mis pensamientos vuelven a los orígenes del cine y la explicación que dio el crítico Dan North del concepto de Tom Gunning de «cine de atracciones», según la cual «el origen de la fascinación era la máquina que hacía moverse las imágenes y no los temas o las historias representadas». ¹³ En mi práctica artística, yo también soy culpable de haberme dejado seducir en un primer momento por la magia de la tecnología de la RA. Sin embargo, creo que es importante para los artistas empezar así: entender y dejarse inspirar por las oportunidades de la tecnología, para después ir más allá y hacer avanzar el medio, impulsando la tecnología y evolucionando a nuevas formas y contenidos. Pearson dice que «si las ideas simplemente giran en torno al virtuosismo o la destreza técnica de la máquina», el artista se habrá convertido en un «esclavo» de esta (o, como decía McLuhan en la cita anterior, «un mero autómatas» que no entiende los nuevos poderes); en este caso, «solo se sirve a la tecnología». ¹⁴

LA IMPORTANCIA DE TRABAJAR DIRECTAMENTE CON LA TECNOLOGÍA

Para trascender de verdad esa fascinación y evolucionar desde el punto de vista conceptual, el artista tiene que ser capaz de trabajar directamente con la tecnología. Una de las primeras soluciones para salvar el abismo entre tecnología y artistas no programadores fue DART, un conjunto de herramientas de RA para diseñadores, desarrollado en el Georgia Institute of Technology. En el artículo, publicado en 2004, «DART: A Toolkit for Rapid Design Exploration of Augmented Reality Experiences» (DART: una herramienta para la rápida exploración del diseño de experiencias de realidad aumentada), se afirma que «los diseñadores son mucho más eficaces cuando trabajan directamente con un medio, ya que el uso de intermediarios perjudica (o incluso destruye) el proceso creativo». ¹⁵ Los autores ilustran este punto con el ejemplo del pintor que va indicando a un ayudante dónde aplicar la pintura en un lienzo, en lugar de manejar el pincel él mismo.

Como artista que trabaja con RA desde 2005, he descubierto que para mi trabajo es esencial experimentar y trabajar con el medio directamente y a través de un intermediario como un



«El arte no es lo
que tú ves, sino
lo que haces ver
a otros.»

EDGAR DEGAS (1834-1917)
Pintor y escultor francés

Un cohete se estrella
en la Luna en un fotograma de
la película *Viaje a la Luna*, de
Georges Méliès, de 1902





programador informático (al menos en una fase inicial). Esto me ha permitido conocer mejor las limitaciones y posibilidades de la tecnología que he usado como punto de partida para mis ideas. Lo primero que hago es estudiar las características de la tecnología, experimentar con el medio directamente para comprender qué hace bien y qué no hace tan bien.¹⁶ Este modo de exploración significa desarrollar unos contenidos a partir de una historia emergente que evoluciona desde la propia tecnología, en lugar de empezar por una historia que yo querría adaptar a la tecnología. Creo que este enfoque es fundamental para entender un nuevo medio. Una vez dominadas las características de la tecnología, la experimentación puede impulsarla hacia formas novedosas.

HALLUCINATORY AR (2007) COMO CASO PRÁCTICO

Una de mis primeras obras con RA en las que adopté este enfoque es *Hallucinatory AR* (2007), un experimento artístico en el que empleé técnicas de imagen sin marcadores para generar elementos visuales de RA. (Hay que tener en cuenta que estos experimentos se hicieron antes de que yo trabajara con Reconocimiento de Características Naturales [NFT, por sus siglas en inglés]; mi trabajo con RA por entonces aún se basaba en el reconocimiento de marcadores de referencia.) Este proyecto me lo inspiró un accidente ocurrido en un proyecto anterior, cuando el *software* de RA malinterpretó una imagen que no era un marcador de RA. El contenido de RA previamente asignado a un marcador ahora aparecía superpuesto a una imagen sin marcador, lo que dio lugar a la aparición intermitente de unas imágenes de RA inesperadas e imprevistas. Decidí aprovechar ese accidente y explorar más a fondo las posibilidades creativas y artísticas de este efecto mediante experimentos con reconocimiento no basado en marcadores tradicionales. El proceso implicaba un estudio para averiguar qué tipos de imágenes sin marcador podrían generar tales «alucinaciones» y una búsqueda de imágenes que pudieran evocar o producir múltiples imágenes de RA a partir de una única imagen/no marcador.

Tras múltiples búsquedas de imágenes, surgió una bastante extraordinaria. Una vidriera de catedral podía evocar/d desencadenar cuatro tipos diferentes de imagen de RA; el único caso, de entre muchas otras imágenes, en el que aparecieron múltiples imágenes de RA. Al examinar la imagen con atención, enfocando fuera y dentro con la cámara web, de la trama de blanco y negro empezó a surgir una cara. Nos encontramos con la imagen fantasmagórica de un hombre. Es interesante mencionar que, cuando empezamos a difuminar la cara usando la cámara web, las imágenes alucinatorias en RA funcionaron mejor, se multiplicaron y aparecieron con rapidez y claridad mayores. Aunque hicimos numerosos intentos con imágenes similares, no se dieron más casos como este; al parecer esta imagen era única.

El reto ahora consistía en decidir qué tipos de imágenes insertar en esta visión alucinatoria: ¿qué imágenes le irían mejor a este formato fantasmagórico y onírico de RA?

Para la imaginería y los videoclips decidí crear formas, con la intención de originar un conjunto de elementos visuales tipo *collage*. Como la secuencia o la duración de las imágenes en *Hallucinatory AR* no se podían predeterminar debido a la naturaleza «irregular» del reconocimiento de imágenes sin marcador, el objetivo era identificar imágenes que guardaran similitudes, con las que existiera la posibilidad de crear sincronías visuales.



Las intrusiones y los encuentros casuales también están presentes en *Hallucinatory AR*, que debe parte de su inspiración al artista surrealista Max Ernst. En «¿Cuál es el mecanismo del *collage*?» (1936), Ernst escribe:

Un lluvioso día de 1919, estando yo en un pueblecito del Rin, me sorprendí mirando obsesivamente las páginas de un catálogo ilustrado que mostraba objetos diseñados para demostraciones antropológicas, microscópicas, psicológicas, mineralógicas y paleontológicas. Descubrí elementos de figuración juntos tan remotos, que el puro disparate del conjunto provocó en mí una súbita intensificación de las facultades imaginativas y suscitó una sucesión ilusoria de imágenes contradictorias, imágenes dobles, triples y múltiples, apiladas unas sobre otras con la persistencia y rapidez propias de los recuerdos y visiones amorosas de un duermevela.¹⁷

De especial interés para mi trabajo de exploración y experimentación con *Hallucinatory AR* fue la descripción que hacía Ernst de una «sucesión ilusoria de imágenes contradictorias» suscitadas (y por tanto independientes del artista), que se multiplicaban y apilaban con la persistencia y rapidez propias de un estado de «duermevela». Se pueden argumentar similitudes con el proceso de las aparentemente desiguales imágenes de RA en *Hallucinatory AR*, que aparecen y desaparecen de maneras desconcertantes, en capas superpuestas.

Uno se pregunta si el futuro de la RA va a consistir en estos accidentes visuales: errores no deseados en los sistemas de *software*, como los describe Bruce Sterling en «Beyond the Beyond» (Más allá del más allá), en *Wired.com*;¹⁸ o tal vez debamos deleitarnos sin más con la poesía visual de estas alucinaciones aumentadas que son «bellas como el encuentro fortuito, sobre una mesa de disección, de una máquina de coser y un paraguas» (la alegoría tantas veces citada del conde Lautréamont, famoso por haber inspirado a los artistas surrealistas Max Ernst y André Breton).¹⁹

Para un informático, estos «fallos técnicos», tal como se explotan en *Hallucinatory AR*, podrían considerarse o interpretarse como un desastre, un error tecnológico. Para el artista, en cambio, hay poesía en estos errores y de ellos emergen nuevas posibilidades de expresión y nuevas formas visuales. Profundizando en la teoría que

expongo aquí, *Hallucinatory AR* no seguía un formato tradicional, sino que era un nuevo enfoque, algo que permite que la RA inspire y evolucione de maneras inéditas, «explorando las cualidades únicas de expresión que hace posible la nueva técnica».

Igual que Méliès introdujo nuevos estilos formales, convenciones y técnicas que eran específicas del cine, también emergerán nuevos estilos y convenciones novedosas de los artistas de RA. Méliès se hizo famoso por el *stop trick* o efecto especial de doble exposición, una técnica que evolucionó a partir de un accidente: la cámara de Méliès se atascó mientras filmaba las calles de París. Cuando revisó la película, vio que un autobús se transformaba en un coche fúnebre. En lugar de descartarlo como un fallo técnico o «error», lo utilizó como una técnica en sus películas. *Hallucinatory AR* también nació de un accidente, que después fue adoptado y aplicado en un intento por desarrollar una modalidad visual potencialmente nueva utilizando RA (véase <http://augmentedstories.files.wordpress.com/2010/10/arview-iphone.jpg>).

ACCESO PARA EL ARTISTA

Pearson afirma que «las herramientas electrónicas siguen siendo reticentes y torpes y no facilitan el trabajo de una forma directa y expresiva».²⁰ Asimismo, dice que en los modos de expresión tradicionales la participación del artista era más directa. Pearson confiesa su «relación amor/odio con los ordenadores», que exigen demasiado tiempo para poder aprender «su lenguaje», y su «renuencia a aprender a programar».²¹ Los problemas de acceso son clave para la investigación creativa del artista en un medio determinado.

Lo que le ocurre a Pearson nos devuelve a la cuestión del acceso al artista. Tal y como apunta Malina, «el ordenador no ha sido diseñado con las necesidades específicas de los artistas en mente».²² Margot Lovejoy recuerda que la «primera oleada» (1965-1975) de uso de ordenadores en artes visuales estuvo dominada por científicos con acceso a equipos, y que hasta la «segunda oleada» los artistas no empezaron a tener un acceso más generalizado. Después, en la siguiente década, una serie de artistas participó por primera vez en el desarrollo de nuevas herramientas de *software*. A medida que los creadores van teniendo más acceso a potentes herramientas informáticas a bajo coste, señala Lovejoy, nace una nueva estética. Esto nos recuerda las reflexiones de Gene Youngblood recogidas en *New Media: A Critical Introduction*, de Martin Lister: «El potencial estético de este medio no se explotará



plenamente hasta que los artistas computacionales lleguen al instrumento desde el arte y no desde la ciencia informática». ²³ Estoy de acuerdo, y es algo que empieza a verse ahora que los creadores empiezan a trabajar con la tecnología emergente de la RA, que tradicionalmente ha pertenecido al terreno de la informática. Si hacemos caso a Lovejoy, podemos pensar que la RA vive hoy una «segunda oleada». Surgirán nuevas tendencias estéticas y estilísticas a medida que se desarrollen herramientas más accesibles y sencillas destinadas a los artistas que idealmente deberían estar diseñadas con su participación.

Me intriga que el libro *Program or be Programmed* (Programar o ser programado), de Douglas Rushkoff, ²⁴ trate de artistas no programadores que trabajan en RA. Mi opinión es que, puesto que no suelen ser programadores de RA, los artistas necesitan sumergirse en la tecnología y comprender sus reglas para luego tratar de forzarlas y descomponerlas. Sin embargo, para que un nuevo medio progrese de verdad, ¿tienen que ponerse los artistas a la altura de los programadores? Mi enfoque ha sido trabajar con las limitaciones y buscar maneras de reeditar el *software* existente y ampliarlo de un modo creativo. También he trabajado y colaborado con programadores, puesto que creo que mi punto fuerte es el uso creativo del *software* frente a su utilización tal y como viene de fábrica. Trabajo con el *software* de la manera más directa posible, jugando con la tecnología, rompiéndola incluso para entender cómo funciona (de ello hablo en mi charla TEDx «How Does Wonderment Guide the Creative Process?» [¿Cómo orienta la admiración el proceso creativo?]²⁵). Pero, como artistas, ¿tenemos que ir aún más allá de lo que nos ofrecen las herramientas y funciones preseleccionadas disponibles? Desde luego que hay creadores que también son excelentes programadores y técnicos. Para este grupo determinado sí es posible lo anterior, ya que disponen de los conocimientos y las habilidades necesarias. Si no es ese el caso, aparte de jugar y aprender todo lo posible de la tecnología en función de los conocimientos de cada uno, creo que la respuesta está en la colaboración y el diálogo entre artistas y programadores.

EL ENFOQUE DE UN ARTISTA DE LA TECNOLOGÍA COMO HERRAMIENTA Y MEDIO

Héctor Rodríguez, artista digital y teórico de los nuevos medios, diferencia dos maneras en las que un artista puede ver la tecnología: como herramienta o como medio. Rodríguez sostiene que «los artistas de medios que ven la tecnología como una herramienta prefieren con frecuencia que permanezca invisible». ²⁶ Por el contrario, «los que la consideran un medio, por lo general buscan destacar su visibilidad y por tanto resistirse a las presiones para ocultar su funcionamiento interno». ²⁷ El artista que ve la tecnología como una herramienta la usa «para hacer realidad una idea previa», cuyo resultado es «predefinido y predecible», y rara vez «adquiere un conocimiento profundo de las tecnologías empleadas». ²⁸

Cuando la tecnología se ve como un medio artístico, las ideas creativas proceden de una comprensión profunda de su funcionamiento. (Esto enlaza con mi aproximación a la RA expuesta anteriormente.) Rodríguez continúa diciendo que «las tecnologías de medios se convierten así en fuentes de ideas artísticas y no en meros conductos para su implantación. El concepto creativo depende en esencia de un conocimiento exhaustivo de las tecnologías que lo harán realidad». ²⁹ Aquí también procede recordar a Méliès, para quien la tecnología fue fuente de inspiración de historias que evolucionaban a partir de la técnica.



Footfalls (2006) de Tmema (Golan Levin & Zachary Lieberman), es una instalación audiovisual interactiva en la que las pisadas de los visitantes crean avalanchas en cascada de formas virtuales saltarinas

«Son necesarias varias líneas de análisis para desarrollar nuevas formas de expresión artística computacional. La primera pasa por conocer las posibilidades específicas del ordenador y crear formas de arte que las exploten»,³⁰ afirma Malina, que nos recuerda que este enfoque «experimental y empírico» es el que siguen varios artistas digitales. Yo clasificaría esta aproximación a la tecnología como medio usando la definición de Rodríguez, según la cual las formas de arte y las ideas creativas surgen de un conocimiento profundo y una perfecta comprensión de cómo funciona la tecnología. Malina, sin embargo, al igual que Pearson, nos advierte de que los artistas pueden no ser capaces de trascender las posibilidades de la tecnología, y los defensores del enfoque empírico dirán que «hasta que el artista no tenga acceso a la tecnología no podremos conocer en su totalidad sus posibilidades creativas».³¹

LA TÉTRADA DE MARSHALL MCLUHAN Y LA RA

Adaptar la téttrada de McLuhan a la RA es un ejercicio interesante con vistas a analizar tanto los antecedentes como la posible evolución de la RA. La téttrada de McLuhan establece las siguientes leyes para los medios: ampliar, volver obsoleto, recuperar y revertir. Examinemos cómo se reflejan estas leyes en la RA. ¿Qué aspecto de la sociedad extiende o amplifica la RA? Creo que la RA aumenta el intercambio de información, el ocio, los juegos, la educación y la visión humana. ¿Qué vuelve obsoleto o deja a un lado la RA? Creo que la RA vuelve obsoletos la realidad virtual y los entornos virtuales intangibles. ¿Qué recupera la RA y vuelve a situar en el centro de la atención, rescatándolo de la obsolescencia? En mi opinión, la tactilidad, el contacto físico, la movilidad y el espacio físico, así como el aparato de visión de un solo usuario (por ejemplo, el estetoscopio de principios de la era victoriana). ¿Qué revierte o transforma la RA cuando un medio ha terminado su recorrido o ha desarrollado todo su potencial (con vistas al futuro de la RA)? Creo que la RA revierte la ventana y la pantalla donde no hay filtro/mediación, identificables y el individuo no puede distinguir entre real y virtual. La RA también tiene el potencial de transformarse en tecnologías sensoriales avanzadas donde el cerebro está conectado al sistema digital en escenarios de interfaz directa entre él y el mundo.

RE-MEDIACIÓN Y TRANSICIÓN

Para que un artista pueda crear algo innovador e impulsar el crecimiento creativo de una tecnología emergente, tiene que aprovechar las posibilidades de expresión del nuevo formato, en lugar de regresar a formatos anteriores. En *Remediation*, el teórico de los medios Steven Holtzman argumenta que los intentos de reeditar «no explotan las cualidades especiales únicas en los mundos digitales» y que «esas cualidades únicas son las que, en última instancia, definirán la totalidad de los nuevos lenguajes de expresión».³² Holtzman describe la reedición como un «paso de transición» que permita «pisar con seguridad en un terreno nuevo y poco familiar» y se apresura a aclarar que «no es así como descubriremos las nuevas dimensiones de los mundos digitales en su totalidad».³³ Asimismo, señala que hay que «trascender lo antiguo» para descubrir lo nuevo porque, «al igual que una señal de tráfico, la reedición es una indicación de que a la vuelta hay un cambio profundo».³⁴ No puedo estar más de acuerdo.







El presente es un tiempo de transición para la RA. Hay formas, estilos y convenciones nuevas a la vuelta de la esquina. Es un momento crucial para que los artistas experimenten con la tecnología y actúen como pioneros para ir conformando el medio, para utilizar las posibilidades únicas de la RA en la generación de nuevos modos y nuevas técnicas de expresión.

LA IMPORTANCIA DE LOS ARTISTAS QUE TRABAJAN CON NUEVAS TECNOLOGÍAS

El artista Golan Levin nos explica cómo los artistas de nuevos medios desarrollaron en su momento prototipos de muchas de las actuales tecnologías:

Como emisario ocasional de los nuevos medios de expresión artística, a menudo me veo obligado a puntualizar que la mayoría de las tecnologías hoy muy comunes y valoradas fueron concebidas y desarrolladas en forma de prototipo ya hace años por artistas de medios emergentes. En algunos casos es fácil reconocer la firma inconfundible del dueño de la idea artística original y adelantada a su época —es posible incluso que fuera desechada por inservible o poco práctica—, pero que, después de complejas cadenas de influencia y reinterpretación, ha llegado a ser absorbida en la cultura, generaciones de ordenadores más tarde, como un elemento cotidiano.³⁵

Levin destaca la importancia de «incluir artistas en el ADN de cualquier laboratorio de investigación tecnológica serio (como ya se ha hecho en Xerox PARC, el Laboratorio de Medios del MIT y el Atari Research Lab, por dar solo unos ejemplos)», y apunta que «los artistas planteaban cuestiones novedosas que, en caso contrario, no se habrían suscitado». También afirma que, si queremos «dar el salto al futuro», es necesario «contar con artistas que hayan hecho suyo el problema de explorar las repercusiones sociales y las posibilidades experimentales de la tecnología». Continúa diciendo que «lo que empieza como un experimento artístico y especulativo se materializa, tras una larga digestión cultural, en una herramienta o un juguete imprescindibles».³⁶

Por lo tanto, el papel del artista en las primeras fases de una tecnología emergente es más importante de lo que se suele pensar, ya que sus exploraciones llevan a desarrollar tecnologías que luego se vuelven de uso común, como señala Levin. La función del creador que trabaja con tecnologías emergentes es inspirarse en ellas como medio (pero sin dejarse deslumbrar), conocer sus posibilidades y explotarlas como un «colonizador» y un pionero. No caer en la trampa de la re-mediación, sino esforzarse por crear un lenguaje estético y formal por completo nuevo, que lleve incluso a liberarse de las restricciones del entorno. Tal vez sea este el único camino para crear algo verdaderamente innovador. Por ahí debe ir la RA, y es fundamental que los artistas de RA actúen como pioneros y nos guíen en esa dirección.



NOTAS

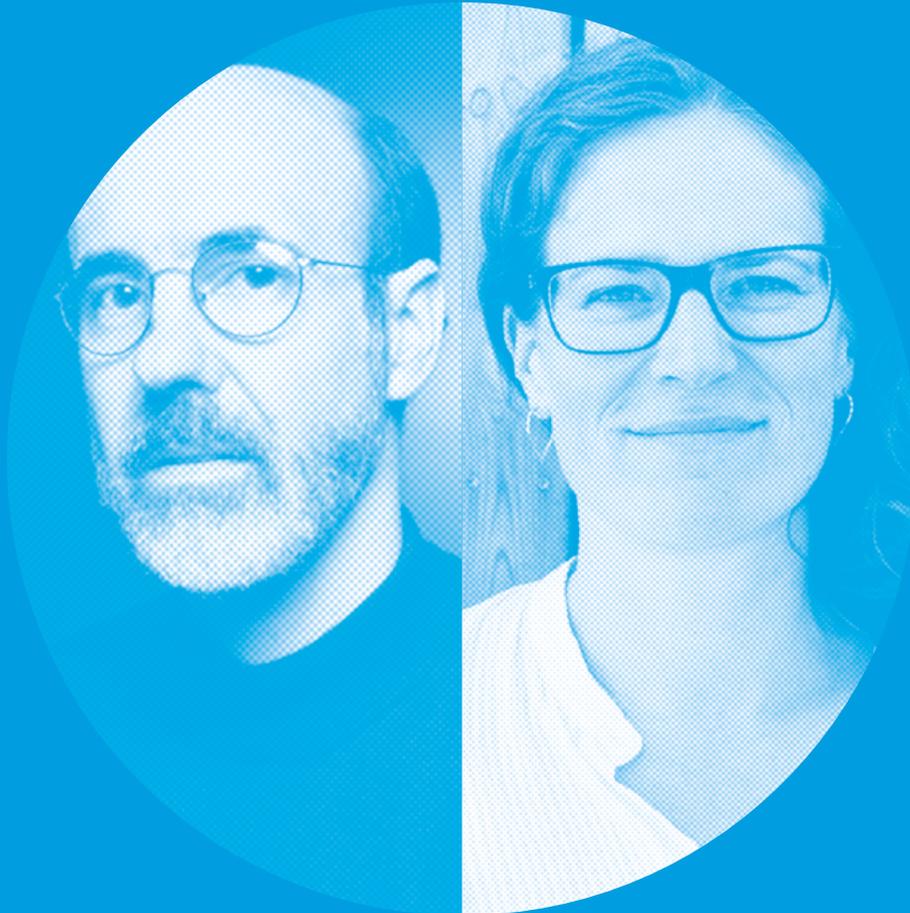
1. Pearson, J., «The Computer: Liberator or Jailer of the Creative Spirit», en *Leonardo. Supplemental Issue, Electronic Art*, vol. 1, 1998, p. 73.
2. *Ibid.*
3. Malina, R. F., «Digital Image-Digital Cinema: The Work of Art in the Age of Post-Mechanical Reproduction», en *Leonardo. Supplemental Issue, Digital Image, Digital Cinema: SIGGRAPH'90 Art Show Catalog*, vol. 3, 1990, p. 38.
4. Pearson, J., *op. cit.*, p. 76.
5. *Ibid.*, p. 79.
6. *Ibid.*
7. McLuhan, M., «The Relation of Environment to Anti-Environment», en McLuhan, E. y Terrence Gordon W. (eds.), *Marshall McLuhan Unbound*, Corte Madera, California, Gingko Press, 2005, p. 9.
8. Malina, R. F., *op. cit.*, p. 34.
9. Berton, J. A. y Andrew, J., «Film Theory for the Digital World: Connecting the Masters to the New Digital Cinema», en *Leonardo. Journal of the International Society for the Arts, Sciences and Technology. Digital Image/Digital Cinema: A Special Edition with the Special Interest Group in Graphics (SIGGRAPH) Association of Computing Machinery*, Nueva York, Pergamon Press, 1990, p. 7.
10. *Ibid.*
11. *Ibid.*
12. Pearson, J., *op. cit.*, p. 76.
13. North, D., «Magic and Illusion in Early Cinema», en *Studies in French Cinema*, vol. 1, n.º 2, 2001, p. 70.
14. Pearson, J., *op. cit.*, p. 76.
15. MacIntyre, B. et al., *DART: A Toolkit for Rapid Design Exploration of Augmented Reality Experiences*, 2004, p. 197.
16. Papagiannis, H., «“Wonder Turner” and “The Amazing Cinemagician” Augmented Reality and Mixed Reality Art Installations», en *2010 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR) – Arts, Media, and Humanities (ISMAR-AMH)*, Seúl, del 13 al 26 de octubre de 2010, pp. 27-32.
17. Max, E., «What is the Mechanism of Collage?», en Chipp, H. B. (ed.), *Theories of Modern Art*, Berkeley, University of California Press, 1974, p. 427.
18. Sterling, B., «Augmented Reality Glitches», en *Beyond The Beyond*, 29 de agosto de 2009. http://www.wired.com/beyond_the_beyond/2009/08/augmented-reality-glitches/
19. Williams, R., *Art Theory: An Historical Introduction*, Malden, Massachusetts, Blackwell Publishing, 2004, p. 197.
20. Pearson, J., *op. cit.*, p. 78.
21. *Ibid.*, p. 80.
22. Malina, R. F., *op. cit.*, p. 34.
23. Lister, M., *New Media: A Critical Introduction*, 2.ª edición, Nueva York, Routledge, 2009, p. 60.
24. Rushkoff, D., *Program or be Programmed: Ten Commands For a Digital Age*, Nueva York, OR Books, 2010.
25. Papagiannis, H., «How Does Wonderment Guide the Creative Process?», presentación TEDxYorkU, octubre de 2010. <http://www.youtube.com/watch?v=ScLgtkVTHDc>
26. Rodríguez, H., «Technology as an Artistic Medium», en *2006 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, Taipéi, del 8 al 11 de octubre de 2006, p. 3.638.
27. *Ibid.*
28. *Ibid.*, p. 3.635.
29. *Ibid.*
30. Malina, R. F., *op. cit.*, p. 34.
31. *Ibid.*
32. Bolter, J. D. y Grusin, R., *Remediation: Understanding New Media*, Cambridge, Massachusetts, The MIT Press, 1999, p. 49.
33. *Ibid.*
34. *Ibid.*
35. Golan Levin. <http://www.flong.com/blog/2009/new-media-artworks-prequels-to-everyday-life/>
36. *Ibid.*



Entornos aumentados y nuevos medios digitales

JAY DAVID BOLTER Y
MARIA ENGBERG

Imagen de apertura:
El 27 de enero de 2011 Amir Baradaran se infiltró en el Louvre para instalar un *streaming* en directo de 52' sobre *La Gioconda*, de Leonardo da Vinci. Usando una aplicación de realidad aumentada de *smartphone*, *Frenchising Mona Lisa* busca provocar sobre cuestiones de identidad nacional, iconografía y prácticas museográficas



Jay David Bolter

Georgia Institute of Technology, Atlanta, EEUU

Jay David Bolter es titular de la cátedra Wesley de Nuevos Medios y codirector del Augmented Environments Lab del Georgia Institute of Technology. Es autor de *Remediation* (1999), en colaboración con Richard Grusin, y de *Windows and Mirrors* (2003), en colaboración con Diane Gromala. Además de escribir sobre los nuevos medios, colabora en la construcción de nuevas modalidades de medios digitales. Creó con Michael Joyce Storyspace un sistema de creación de hipertextos. En la actualidad trabaja en estrecha colaboración con los profesores Blair MacIntyre, Maria Engberg y otros en el uso de realidad aumentada para la creación de experiencias con nuevos medios para los sectores cultural y del entretenimiento.

Maria Engberg

Malmö Högskola, Malmö, Suecia
Georgia Institute of Technology, Atlanta, EEUU

Maria Engberg es profesora ayudante del departamento de Tecnología de Medios y Desarrollo de Productos de la Universidad de Malmö e investigadora asociada en Augmented Environments Lab del Georgia Institute of Technology de Estados Unidos. Sus áreas de investigación incluyen la estética digital, los medios locativos y los estudios de medios. Es coeditora de *Ubiquitous Computing, Complexity, and Culture* (Edman et al., Routledge 2015) y autora de varios artículos sobre estética y literatura digitales, medios locativos, realidad aumentada y realidad mixta. Engberg diseña experiencias móviles de realidad aumentada y mixta para fines culturales y de entretenimiento.

Los medios son ubicuos, sobre todo en los entornos urbanos. Una de las razones es que la gran mayoría de nosotros llevamos encima casi siempre *smartphones*, vestibles o *tablets*. Estos dispositivos móviles son plataformas para la re-mediación de los medios tradicionales (libro impreso, cine, televisión y música grabada) y de las nuevas formas digitales, como videojuegos, redes sociales y aplicaciones de realidad aumentada y virtual. El siguiente paso en nuestra cultura de medios será la multiplicación y diversificación continuada de formatos. No habrá un único medio (por ejemplo, realidad virtual) que absorba todos los demás, sino que diferentes medios florecerán, cada uno aumentando aspectos diferentes de nuestra experiencia diaria.

UBICUIDAD DE LOS MEDIOS

Los medios están en todas partes. Otros avances, sobre todo en biotecnología, pueden tener, en última instancia, un impacto social muy superior, ya que prometen rehacer el concepto de lo que es ser humano. Pero, si nos fijamos, veremos que los cambios más visibles que ha experimentado nuestra civilización en los últimos cincuenta años se han producido en el campo de los medios. Muchos, quizá la mayoría, de los lectores de este artículo recordarán un tiempo en que no existían *smartphones* ni *tablets*, en que los teléfonos móviles eran voluminosos y propiedad, por lo general, de hombres de negocios y «pioneros», cuando era imposible ver series de televisión o películas en el ordenador, cuando los televisores LCD o LED de pantalla plana eran raros y muy costosos. Hoy en día quienes viven en economías avanzadas llevan siempre consigo dispositivos de medios. Bares y aeropuertos tienen monitores de televisión casi literalmente en cualquier dirección en la que se mire. Los ascensores de los edificios de oficinas tienen pequeñas pantallas para ver noticias por cable y anuncios publicitarios. Incluso algunas gasolineras proyectan ahora vídeos (y por supuesto publicidad) para que los veamos mientras repostamos combustible. Entretanto, en 2015, tres gigantes de los medios digitales (Google, en este caso Alphabet, Apple y Microsoft) se situaron a la cabeza del resto de compañías en capitalización de mercado. La financiera Berkshire Hathaway Inc. y Exxon Mobil se colocaron en cuarta y quinta posición (Price Waterhouse Cooper 2016). La sexta empresa, Facebook, cuya red social no es más que entretenimiento virtual, va camino de convertirse en una comunidad de usuarios activos equivalente a un cuarto de la población del planeta. Son signos extraordinarios del poder económico y cultural de los medios de comunicación contemporáneos.



Para Hollywood y los aficionados a la ciencia ficción, sin embargo, esto es solo el principio de un futuro saturado de medios. Según su visión, a veces utópica, a veces antiutópica, los medios terminarán por aumentar cada faceta del mundo en el que vivimos. La película *Minority Report* (2002) describe un mundo así. El protagonista, John Anderton, recorre los pasillos de un centro comercial mientras escanean su retina para su identificación. De repente, las paredes y el espacio a su alrededor cobran vida y proyectan publicidad a la medida de sus supuestas preferencias de compra: productos y servicios de realidad mixta, sirenas del centro comercial que lo llaman por su nombre. Google, Facebook y muchos otros sitios ya personalizan la publicidad, pero por supuesto solo en las pantallas de nuestros ordenadores. Mientras, las Microsoft Hololens y algunas gafas de realidad virtual, como las Oculus Rift y las HTC Vive, ya tienen la capacidad de rodearnos de imágenes en 3D. Una película como *Minority Report* podría llevarnos a cuestionarnos si a todos nos espera el mismo futuro que a John Anderton, con publicidad digital recibiéndonos allá donde vayamos... ¿Es este el siguiente paso?

En 1991, en un artículo muy oportunamente titulado «El ordenador del siglo XXI», Mark Weiser propuso en el Xerox Parc el término «informática ubicua» para describir el modo en que las redes de ordenadores se integrarían en nuestro tejido físico, económico y social. Anticipaba un mundo en el que nuestros electrodomésticos, coches y edificios estarían equipados con sensores e interconectados entre sí. No solo se comunicarían con nosotros, también directa e invisiblemente entre ellos, para adelantarse y satisfacer nuestras necesidades. Veinticinco años después, la visión de Weiser se está materializando en lo que llamamos internet de las cosas, a saber: una serie de dispositivos repartidos por nuestro entorno que reúnen datos sobre nosotros y también para nosotros. El modelo de negocio imperante en el internet de las cosas es aprender todo lo posible acerca del cliente para poder ofrecerle servicios y productos que le resulten de valor. En el sector industrial, el internet de las cosas incluye todo tipo de sensores y controladores para los distintos procesos. Entre los consumidores va ganando aceptación el hogar inteligente: termostatos e iluminación inteligentes, sensores de movimiento para seguridad, puertas que se pueden bloquear o desbloquear desde internet, etcétera, se usan cada vez más para «aumentar» nuestras casas y nuestros apartamentos. Pero los servicios y productos más populares son, con diferencia, los nuevos medios de comunicación. Nuestros teléfonos, *tablets*, relojes inteligentes y otros dispositivos «vestibles» y ordenadores portátiles son la esencia de la informática ubicua hoy en día, ya que los empleamos para reconfigurar nuestra cultura de medios. Y Weiser se equivocó en un aspecto importante: los dispositivos de informática ubicua no tienen que integrarse silenciosamente en nuestro mundo para ser ubicuos. Como ya comprendió Steve Jobs (y esto es lo que llevó a Apple a liderar la lista Forbes de empresas), los clientes no quieren que sus dispositivos de comunicaciones sean invisibles, quieren un móvil bonito y elegante que les haga sentir que van a la moda y a la vez tenga las mejores prestaciones. Es más, no deberíamos pensar en que los medios ubicuos son solo los productos digitales más modernos. La cultura mediática actual también incluye muchas formas «tradicionales»: libros en papel, periódicos, revistas, fotografía, películas, radio y televisión, todos con sus correspondientes versiones digitales. La interacción de todas estas formas constituye hoy en día el sistema ubicuo de comunicaciones. Ubicuidad no solo significa que los medios de comunicación están por todas partes en nuestro día a día, también que se combinan e interactúan entre sí de todas las maneras imaginables.

Si el concepto de ubicuidad de Mark Weiser nos ayuda a entender la cultura de medios contemporánea, un estudiante de tecnología anterior a él, Marshall McLuhan, a pesar de





todos sus excesos e incoherencias, en *Comprender los medios de comunicación* (1964) nos proporcionó una perspectiva esencial al señalar que los nuevos medios de comunicación amplían nuestros sentidos y alteran su rango de alcance. Con esto no queremos decir que aceptamos la definición de McLuhan del llamado «determinismo tecnológico». No debemos pensar que las tecnologías de comunicaciones radicales (como el libro en el siglo XV, la cámara de cine en el siglo XX o el *smartphone* ahora) son agentes autónomos ajenos a nuestro control que alteran lo que significa ser humano. Un modo más productivo de entender el proceso es reconocer una relación recíproca entre las características de cada nueva tecnología de comunicaciones y el modo en que nosotros, como cultura, desarrollamos dicha tecnología.

Como inventores y consumidores, hacemos elecciones sobre lo que constituye un medio nuevo y cómo lo usaremos. Por ejemplo, decidimos como sociedad que la radio, que se había concebido originalmente como un medio bidireccional para la comunicación individual (lo que hoy en día llamamos «radioafición»), se transformara (en Estados Unidos a partir de la década de 1920) en un medio unidireccional para la retransmisión comercial de música, series, noticias, etcétera, lo que nos dio más posibilidades de escuchar, pero no de responder. A finales de la década de 1920 decidimos, como sociedad, que el cine, que había florecido en su formato «mudo», tenía que convertirse en un medio audiovisual y, más tarde, en la década de 1950, que adoptara el formato de proyección anamórfica en pantalla ancha.

En la actualidad estamos decidiendo de qué modo nuestros medios de comunicación ubicuos aumentarán nuestro mundo sensorial con nuevas formas de entretenimiento y comunicación. Estamos configurando teléfonos móviles, vestibles y sensores portátiles y remotos en plataformas dirigidas a nuestros sentidos de la vista, el oído, la propiocepción o personificación y el tacto. Como veremos más adelante, actualmente los medios ubicuos combinan muchos de nuestros sentidos y capacidades humanas, y usamos nuestros dispositivos simultáneamente de maneras que requieren la intervención de múltiples sentidos.

Es también importante recordar que la ubicuidad de los medios no significa que un único medio se imponga a todos los demás. Aunque los videojuegos y las redes sociales son las formas más populares hoy en día, sigue habiendo nutridas comunidades de lectores, cinéfilos y televidentes. Nuestra cultura de medios no es solo ubicua, también heterogénea, y tenemos que valorar cómo interactúan las versiones contemporáneas de los medios llamados tradicionales con los medios digitales.



«Señor Marks, por orden de la División Precrimen del distrito de Columbia le detengo por el futuro asesinato de Sarah Marks y Donald Dubin que iba a suceder hoy.»

Minority Report (2002), dirigida por Steven Spielberg, con guion de Scott Frank y Jon Cohen basado en el relato *El informe de la minoría* (1956), de Philip K. Dick (1928-1982)



Minority Report (2002), Steven Spielberg



RE-MEDIACIÓN

A finales de la década de 1990, Jay Bolter y Richard Grusin (1999) introdujeron el concepto de «re-mediación» para explicar cómo los medios influyen los unos en los otros en la actual «economía de medios». Incluso entonces ya era evidente que los medios digitales de la época (internet y videojuegos) mantenían un diálogo constante con los medios tradicionales (especialmente cine y televisión). El diálogo era a veces cooperativo, a veces competitivo. Los productores de nuevas formas digitales aprovechaban formatos, estilos y géneros de los medios ya establecidos al tiempo que proclamaban que lo digital ofrecía algo nuevo y emocionante. Por ejemplo, para anunciar sus productos, los sitios web corporativos reproducían las técnicas de diseño gráfico que el consumidor llevaba décadas viendo en las revistas. A su vez, las páginas web de las empresas fueron pioneras en ventas electrónicas, un formato que combinaba las características del pedido por correo y la telecompra, pero que ofrecía una sensación novedosa, de respuesta inmediata. En la década de 1990 aparecieron los sitios de noticias en línea, a veces propiedad de un periódico impreso, que era re-mediado de forma explícita (como *The New York Times*). Estas páginas web aprovechaban la reputación del medio impreso y reproducían sus artículos escritos. Pero prometían un nuevo nivel de inmediatez. Mientras que un periódico salía una vez o unas pocas veces al día, las nuevas páginas web se podían ir actualizando a medida que se producía la noticia.

El proceso de re-mediación ha continuado durante las dos últimas décadas. De hecho, es un aspecto que define nuestra economía mediática. A medida que se introducen nuevos formatos se explican en términos de los medios existentes. Con frecuencia se usa la fórmula: este nuevo formato es como uno o más de los anteriores, pero mejor. En 2007, durante una de sus famosas presentaciones de nuevos productos, en este caso el iPhone, Steve Jobs dijo que Apple lanzaba en realidad tres nuevos productos: un iPod con controles táctiles, un nuevo y revolucionario teléfono móvil y un navegador de internet (YouTube 2016). Bromeando con el público, les mostró una imagen de un híbrido monstruoso: una tosca forma rectangular con una pequeña pantalla y, debajo, un disco al estilo de los teléfonos antiguos. La siguiente diapositiva presentaba el verdadero primer iPhone, que contenía todas estas características en un elegante dispositivo de moderno diseño. La transición entre esas dos imágenes explica perfectamente lo que es re-mediación, ya que mostraba cómo el nuevo iPhone de Apple había absorbido, modernizado y mejorado de manera ostensible los medios que pretendía sustituir. El iPhone era como un teléfono, pero mejor; como un reproductor de música, pero mejor.

En la misma presentación, Jobs repitió una y otra vez que el iPhone era revolucionario, un dispositivo que lo «cambiaría todo». Los redactores especializados en medios y las empresas digitales suelen adoptar esta retórica. No solo el iPhone, Facebook o Google han cambiado el mundo en el que vivimos. Cada nuevo *smartphone* con una cámara mejorada o con reconocimiento de huellas dactilares o de retina, cada nueva interfaz en Facebook son «revolucionarios». Y, por el contrario, una nueva versión de iPhone ya no es algo revolucionario, sino una mera actualización, con lo que el colectivo digital queda decepcionado. La retórica revolucionaria es una herencia de mediados del siglo XX, la era de la supermodernidad, caracterizada, tanto en el arte como en la expresión popular, por el culto a lo nuevo. La idea era que, para que fuera significativa, toda obra de arte o todo invento nuevos tenían que ser únicos, del todo originales; no solo una mejora, sino un avance. La postura modernista sigue

Rafael
Lozano-Hemmer
Under Scan
Relational
Architecture 11 (2005)
Trafalgar Square,
Londres, Reino
Unido, 2008





muy extendida, a pesar de que nuestra cultura de medios actual se caracteriza por la variedad de impulsos creativos: remezcla y re-mediación, préstamos y reformulaciones de medios y formatos anteriores.

Cooperación y competición están claramente presentes en el hecho de que los principales medios de comunicación del siglo XX hayan sido re-mediados a través de su difusión por internet y su reproducción en pantallas digitales. De momento, la tecnología no ha acabado con ninguno de estos medios. Al contrario, la televisión, la radio, la música grabada y el cine han seguido existiendo como medios independientes, y todos han desarrollado sus correlatos en internet para ponerlos a disposición de los usuarios tras una serie de complejos compromisos económicos y técnicos con los diferentes productores y distribuidores originales. Estas re-mediaciones para internet conservan los nombres que las conectan con sus orígenes: Hulu es televisión por internet, la tienda de iTunes te permite descargar «álbumes» de música, además de películas y series de televisión. Pero al mismo tiempo la re-mediación digital altera el carácter de cada medio. Por ejemplo, podemos ver una película cuando y donde queramos, en la pantalla que elijamos. Toda re-mediación tiene este carácter: la experiencia que ofrece es siempre nueva y, sin embargo, familiar.

Incluso las formas más modernas de nuevos medios digitales son re-mediaciones, préstamos y puestas al día de otras anteriores. Las más exitosas de estas formas innovadoras hoy en día son los videojuegos y las redes sociales, ambos con claros precedentes en formatos analógicos. Los videojuegos son en realidad versiones nuevas de una forma de entretenimiento, el juego competitivo, de miles de años de antigüedad. Algunos videojuegos re-median juegos de tablero, otros, rompecabezas, y hasta juegos de puntería y de habilidad. Algunos géneros de videojuego, como los juegos de rol y de aventuras, también toman prestadas la estructura del guion y las técnicas de la cámara de cine. Y la re-mediación también funciona en la otra dirección; es decir, volver del medio digital al tradicional. El cine puede re-mediar videojuegos, cuando por ejemplo se realiza una película basada en franquicias como *Tomb Raider* o *Resident Evil*. Las redes sociales son hoy el medio digital más utilizado, con miles de millones de usuarios, y uno de los más innovadores. Y, no obstante, cada una de las principales aplicaciones para redes sociales tiene sus orígenes en tradiciones mediáticas anteriores. Facebook comenzó como una re-mediación del anuario de la facultad (en Harvard), con su formato de imágenes e información en texto acerca de los alumnos. Sitios para compartir imágenes, como Instagram y Flickr, re-median el álbum familiar y el fotoreportaje. Twitter combina la brevedad de un SMS con la capacidad de difusión de los medios de masas. Todas estas formas son re-combinaciones de antiguos medios impresos o visuales, y también de medios electrónicos anteriores. Todos ellos redefinen o desdibujan las esferas de lo privado y lo público tal como las conocíamos en los medios anteriores. Y todos añaden las características digitales particulares de una comunicación interactiva y (casi) inmediata.

Tras décadas de salidas en falso, la realidad virtual (RV) acaba de convertirse en un medio ampliamente extendido gracias a la aparición de gafas asequibles, como las de Oculus Rift y HTC Vive, aparte del Google Cardboard y el *software*

que convierte un *smartphone* en unas lentes improvisadas. Estos dispositivos se ofrecen ahora como plataformas idóneas para videojuegos re-mediados, como ser tirador en primera persona (FPS, por sus siglas en inglés), algo que antes se hacía desde la pantalla del ordenador. También existe un interés creciente por las películas en RV, como las creadas por Chris Milk y otros (VRSE.com). Estas películas en RV son re-mediaciones de géneros cinematográficos tradicionales como el documental y el cine de terror. Los cineastas de RV afirman que su visión de 360 grados sitúa al espectador «en la escena» como nunca se había hecho antes.

Se supone que la RV proporcionará una sensación más intensa de inmersión y por tanto una mayor implicación emocional en la acción. Esto es exactamente lo que sostiene Chris Milk en su charla con Ted (2015). La reivindicación de una mayor autenticidad, realidad o implicación es un claro reconocimiento de la re-mediación por parte de los creadores de un nuevo medio. Las películas de realidad virtual son como las tradicionales, pero mejores, afirman sus defensores, porque aumentan la empatía del espectador. En una película de RV llamada *The Displaced* (Los desplazados), por ejemplo, se muestra a unos niños refugiados de los conflictos de Siria, Sudán del Sur y Ucrania en su entorno, mientras nosotros, como espectadores, experimentamos su mundo de refugiados en 360 grados.

La introducción de un nuevo medio es un proceso que consiste en aislar elementos de medios tradicionales y reconfigurarlos de nuevas maneras. La nueva configuración enfatiza cualidades que los antiguos medios podían tener de manera latente, pero también pone de manifiesto dónde se quedaban cortos. Los medios nuevos buscan compensar estas carencias y proporcionar una nueva experiencia que vaya más allá. Por ello, el siguiente paso en cultura de medios, es decir, el aumento de nuestras experiencias mediante dispositivos y servicios móviles, no se percibirá como una ruptura revolucionaria con los medios existentes, sino más bien como un proceso de adaptación cooperativa y competitiva de estos. Podemos esperar que las nuevas re-mediaciones se basen en las formas digitales actuales, combinadas y configuradas de un modo inédito, aunque no podemos predecir cómo serán estas reconfiguraciones. No dejan de aparecer nuevas formas de medios sociales. En los últimos años, el servicio de vídeo e imágenes compartidas de Snapchat se ha vuelto bastante popular, en principio porque las imágenes y vídeos se borran una vez que se ha accedido a ellos, proporcionando al usuario una sensación de privacidad y la garantía de que las imágenes no seguirán circulando. Recientemente han incorporado una serie de aplicaciones a modo de pizarra magnética que permiten aumentar las fotos de variadas maneras, por ejemplo con un intercambiador de caras. Aumentar plataformas ya existentes es una estrategia bastante común. Por ejemplo, la combinación del videojuego con la capacidad de difusión de internet







ha producido Twitch. Cabe esperar que este tipo de aumentos de las formas digitales más populares y atractivas continúe y, en concreto, explote dos capacidades que han estado latentes o poco presentes en los medios dominantes del siglo XX y que ahora prometen formas aumentadas de expresión y comunicación. Esas dos capacidades (aumentos clave) son el reconocimiento de la localización y la información multisensorial (sobre todo táctil y de propiocepción).

INFORMÁTICA URBANA Y MEDIOS MULTISENSORIALES

Cambiar la relación entre presentación y localización es uno de los modos en que los medios digitales móviles están re-mediando los formatos anteriores. Las tecnologías móviles nos permiten llevar medios con nosotros allá donde vamos para experimentarlos en diferentes localizaciones; también pueden hacer que el medio le conozca y responda a su ubicación. Después de todo, el libro en papel lleva cientos de años como medio móvil. Un libro se puede trasladar fácilmente, pero no responderá al cambio de entorno. Por el contrario, la información de un dispositivo móvil puede cambiar porque tiene reconocimiento de la localización (en el exterior por GPS y en interiores por wifi y otros sistemas). Por supuesto que el cambio no es necesario, uno puede llevar una película convencional en su *tablet*, verla donde quiera y seguirá siendo la misma película. Pero ahora la localización se convierte en un parámetro disponible para la re-presentación de cualquier medio en función de donde se produzca la interacción.

Resulta irónico que precisamente sea la libertad de movimiento que los dispositivos móviles ofrecen a sus usuarios lo que permita vincular a un sitio concreto el contenido de un medio digital. Una forma de fijar contenidos es a través del seguimiento de imágenes. El vídeo del teléfono móvil reconoce una imagen, como una foto en una revista o un cómic, y la aplicación puede proyectar contenido digital encima de ella. Esta técnica se ha usado en publicidad: uno abre una revista por la página derecha, abre la aplicación correspondiente, orienta su teléfono hacia la imagen y ve un modelo 3D de un Nissan sobre la imagen en 2D (YouTube 2010). El modelo es animado, las puertas y el maletero se abren y cierran. Marvel Comics ha producido cómics aumentados, en los que apuntando con el teléfono a un panel concreto se consigue una nueva experiencia visual y algún detalle nuevo de la historia (YouTube 2014). También existen juegos de mesa de realidad aumentada (RA) mediante seguimiento de imagen: el tablero es una imagen física, los caracteres son virtuales y se mueven por el tablero cuando se visualizan en la pantalla del teléfono. Todas estas aplicaciones son nichos que pueden crecer en el futuro. En concreto, los niños pueden habituarse a juegos de RA y libros aumentados. Los productos destinados a niños desde hace mucho tiempo combinan medios diferentes (libros desplegados, juegos en los que se desdibuja la frontera entre realidad e ilusión, etcétera) para que resulten divertidos y atraigan su atención.

La segunda forma de fijar un medio es mediante el geoposicionamiento. Se pueden localizar imágenes, texto, audio, cualquier contenido, en unas coordenadas concretas de latitud, longitud y altitud. Un usuario con un *smartphone* puede visitar estos lugares y ver los medios (o escuchar audio a través de su sistema de sonido). *Pokémon GO*, tan de moda en el verano de 2016, es un ejemplo de juego geolocalizado de RA. Durante un par de meses, al

A los pocos días de su lanzamiento —el 6 de julio de 2016—, *Pokémon GO*, el videojuego de realidad aumentada desarrollado por Niantic, alcanzó los 45 millones de usuarios activos. En las imágenes (arriba y derecha), personas capturando pokémons en la Ópera de Sidney, Australia, y en Downing Street, 10, Londres. Imagen izquierda: usuario de una aplicación de realidad aumentada que hace las veces de guía de caminos

Buzz Aldrin, astronauta del Apolo 11, prueba las gafas Hololens durante un pase previo de *Destination Mars*, una exposición que permite experimentar el planeta Marte con versiones holográficas de Aldrin y Hines como guías. Centro de visitantes del Kennedy Space Center, Florida





menos, millones de jugadores recorrieron calles y edificios con sus iPhones y sus Androids, en busca de Pokéstops y gimnasios, al tiempo que reunían huevos, Pokéballs y pociones. Es una re-mediación del tradicional juego de la búsqueda del tesoro; lo atractivo es que el jugador consigue ver y perseguir vívidas imágenes en 3D que flotan en el espacio, mientras que el juego lleva la cuenta de las capturas.

Los medios urbanos en su forma digital no son más que la última etapa en una larga trayectoria de formas re-mediadas de medios basados en la localización. En el siglo XIX nació la publicidad exterior en ciudades de Norteamérica y Europa. Se pintaban anuncios en las paredes de los edificios, y en la década de 1830 comenzaron a imprimirse carteles de gran formato. Estos progresos comerciales procedían a su vez de tradiciones anteriores de «escribir en el mundo», desde los primeros ejemplos de grafiti de Grecia y Roma, si no antes, hasta la escritura en columnas (la de Trajano), edificios y otras estructuras para dejar un mensaje concreto. Sin embargo, la historia moderna de los medios urbanos coincide con los avances digitales, y las posibilidades de aumentar nuestros entornos públicos y privados crecen a medida que la tecnología móvil se expande y es cada vez más accesible. Hoy en día, la adopción de la tecnología está en alza global: el 68% de los adultos en países ricos afirma tener un *smartphone*, el 87% usa internet. Incluso en economías a la zaga de países más ricos, la cantidad de propietarios de *smartphones* se ha disparado desde 2013 (Pew Research Center 2016). A medida que cobra importancia el papel de la tecnología móvil en la expansión de los medios a través del paisaje urbano, el elemento geolocalizador de los *smartphones* resulta más productivo en entornos urbanos.

Las aplicaciones y los servicios pueden incluir geoposicionamiento para proporcionar información concreta y personalizada, y nuestra localización puede enviarse a empresas que, de este modo, reúnen gran cantidad de datos sobre patrones de conducta y movimiento. Los dispositivos móviles que llevamos encima y los situados en objetos y entornos se unen en grandes redes de cosas y personas interconectadas, dándonos la sensación de que toda la ciudad está habitada por medios de variadas formas, algunos evidentes y visibles, otros oscuros y ocultos. Con fines sociales y prácticos, para vigilancia y control, para ocio y servicios comerciales, los entornos urbanos bullen de información digital con la que es posible interactuar.

La condición sociotécnica de las sociedades contemporáneas proporciona a comunicadores, diseñadores y programadores un lienzo sobre el que crear contenidos en nuevos formatos. En las instituciones culturales, las demandas de que amplíen su oferta a públicos fuera del museo se ha afrontado en parte dando acceso móvil

a materiales de archivos culturales ya digitalizados. Museos de todo el mundo han producido contenidos de calidad para dispositivos móviles, que se pueden usar dentro y fuera de los edificios, entre ellos el Guggenheim, el Louvre, el Museo de Arte Moderno de Nueva York, el Museo Canadiense de la Civilización y el Museo Americano de Historia Natural.

Algunas de estas aplicaciones usan reconocimiento de la localización para ofrecer contenidos a sus usuarios, proporcionando una capa de información digitalmente mediada que recubre la ciudad a modo de gigantesco lienzo de realidad mixta. La aplicación Streetmuseum del Museo de Londres de 2012 proporciona a los visitantes imágenes híbridas del presente y el pasado mientras pasean por la ciudad. La experiencia de capas vuelve legible la ciudad, abriendo la puerta de espacios que muchos grupos de ciudadanos rara vez visitan, con la esperanza de democratizar el acceso a contenidos culturales. Otras experiencias de geolocalización con medios digitales se centran en la información, la comunicación y el ocio. Las hay también que son exploraciones estéticas de arte mediado en entornos urbanos. Ejemplos tempranos de arte urbano digitalmente tratado son el proyecto *34 North 188 West* de Los Ángeles (Knowlton *et al.* 2012) y *Urban Tapestries* (2002-2004) de Proboscis, una plataforma de *software* que permite a los usuarios construir conexiones entre lugares y asociar información digital a dichos lugares. Hoy en día la localización es ubicua en los dispositivos de medios, y muchos servicios y aplicaciones la utilizan de forma regular como parte de su recogida de datos destinados a proporcionar al usuario información más precisa, para navegación, publicidad, ocio, juegos o cultura.

Uno de los próximos pasos en estos medios ubicuos serán las tecnologías que se comuniquen con varios de nuestros sentidos a la vez y modifiquen nuestros entornos todavía más intensamente, como por ejemplo las Hololens, ya disponibles en preproducción y que ofrecen visión de «realidad mixta» (RM). Un vídeo promocional (Microsoft 2016) muestra a usuarios de las Hololens poniéndose unas elegantes gafas, dispuestos a experimentar e interactuar con gráficos en 3D y capas de sonidos espaciales superpuestas a su entorno visual. En el vídeo, el espacio del hogar o de la oficina cobra vida con «hologramas» animados: en unos el cuerpo humano se desmonta de manera que un estudiante pueda ver mejor los órganos, los músculos y el esqueleto. Un equipo de diseñadores industriales trabaja en lo que parece ser un nuevo controlador de videojuegos: flota delante de ellos para que puedan examinarlo desde todos los ángulos. Juegos en RA surgen de la mesa o la pared para proporcionar nuevas formas de entretenimiento. Los monitores de vídeo siguen al usuario mientras camina por la habitación. Las Hololens, sin embargo, son un dispositivo que hay que llevar puesto. Se usa por un periodo limitado de tiempo para tareas concretas o para participar en determinados juegos y actividades de ocio. Los dispositivos móviles, con creciente capacidad de absorción de *input*, los aparatos domésticos de alta gama y los dispositivos de baja tecnología, como el Google Cardboard, nos permiten imaginar experiencias en las que participan todos los sentidos humanos. La afirmación ya clásica de McLuhan de que los medios están expandiendo nuestros sentidos, y también los medios anteriores, se antoja ahora más cierta que nunca.





CONCLUSIÓN

El autor de ciencia ficción Vernor Vinge nos ofrece su versión de lo que seguirá a las Hololens en su novela *Al final del arco iris* (2006). El año es 2025, y la realidad aumentada se ha convertido en la tecnología dominante. Los que se han adaptado bien a la vida urbana contemporánea llevan unos trajes sofisticados que les permiten ver, oír, sentir e interactuar con el mundo de datos que los rodea. Una serie de sensores implantados por todo el mundo, pero sobre todo en los núcleos de población, atienden y responden a los humanos vestidos con sus particulares trajes, y toda esta tecnología está conectada a un internet futurista con un ancho de banda gigantesco. Este internet de las cosas y las personas es ininterrumpido (al menos cuando la red mundial funciona bien) y los gráficos y las inscripciones son de tal calidad que es imposible saber dónde termina lo físico y comienza lo virtual.

Una transformación tan completa y radical de todo nuestro entorno no se producirá en un futuro previsible. El año 2025 está a menos de una década. El problema de esta predicción de un mundo tecnológicamente perfecto es no solo que la tecnología progrese a menor velocidad de la que Vinge imaginaba. Hay otro problema más profundo: no existe un medio tecnológico (ni la realidad virtual ni la realidad aumentada) capaz de hacer desaparecer a todos los demás. El «siguiente paso» en nuestra cultura de medios será la continua multiplicación y diversificación de formatos. El principio rector será la abundancia de medios, no la dominancia de uno concreto. Todos los ejemplos que hemos visto tienen un denominador común: son específicos, idóneos para ciertas comunidades de usuarios y determinados usos en ocio, trabajo, comercio o educación. Así es como son ahora los medios: personalizados para comunidades concretas, por numerosas que sean (por ejemplo, Facebook). Como ocurre siempre con la ciencia ficción y la futurología, *Al final del arco iris* no es una descripción del futuro, sino más bien una reinención del presente. La novela de Vinge expresa el deseo de que haya un único formato de medios, en este caso la RA, que se imponga y más o menos sustituya el resto de medios. Es muy probable que la mayoría de las formas surgidas en la era de los medios digitales, en especial los videojuegos y las redes sociales, sigan desempeñando un papel importante, aunque puedan ser objeto de re-mediaciones para adaptarlos a la nueva era de RM. Los juegos de RM, junto con los «tuits» y las «páginas de Facebook», pueden empezar a aparecer en un formato que abarque todo nuestro marco visual, en una pantalla similar a la de las Hololens. Pero no sería sorprendente que los usuarios siguieran tuiteando también en pequeños dispositivos manuales. No sería extraño que algún segmento del público siguiera leyendo libros en papel, yendo al cine y al teatro y cosas por el estilo. Casi todas las aumentaciones del pasado seguirán aquí, aunque tal vez tengan comunidades de usuarios más reducidas. No habrá un único medio que absorba a todos los demás, sino que seguirán surgiendo distintos medios que irán aumentando diferentes aspectos de nuestra experiencia diaria.



BIBLIOGRAFÍA

- Bolter, J. D. y Richard Grusin, R., *Remediation: Understanding New Media*, Cambridge, Massachusetts, The MIT Press, 1999.
- Knowlton, J., Spellman, N. y Hight, J., «34 North 188 West: Mining the Urban Landscape», 2012. <http://www.34n188w.net/34N>
- Microsoft Hololens. <https://www.microsoft.com/microsoft-hololens/en-us/why-hololens>
- McLuhan, M., *Understanding Media: The Extensions of Man*, Nueva York, New American Library Inc., 1964 [Ed. esp. *Comprender los medios de comunicación*, Barcelona, Paidós Ibérica, 2009].
- Milk, C., «How Virtual Reality Can Create the Ultimate Empathy Machine», charla TED, marzo de 2015. http://www.ted.com/talks/chris_milk_how_virtual_reality_can_create_the_ultimate_empathy_machine?language=en (consultado el 15 de septiembre de 2016).
- *Minority Report*, Spielberg, S., 2001, EEUU, Amblin Entertainment.
- Pew Research Center, «Smartphone Ownership and Internet Usage Continues to Climb in Emerging Economies», 22 de febrero de 2016. <http://www.pewglobal.org/2016/02/22/smartphoneownership-and-internet-usagecontinues-to-climb-in-emergingeconomies/> (consultado el 15 de septiembre de 2016).
- Price Waterhouse Cooper, «Global Top 100 Companies by Market Capitalisation: 31 March 2016 update», 2016. <https://www.pwc.com/gr/en/publications/assets/global-top-100-companies-by-marketcapitalisation.pdf>
- Proboscis, *Urban Tapestries*, 2002-2004. <http://proboscis.org.uk/projects/urban-tapestries>
- Vinge, V., *Rainbow's End*, Nueva York, Tor, 2006 [Ed. esp. *El final del arco iris*, Barcelona, Ediciones B, 2008].
- Weiser, M., «The Computer for the 21st Century», en *Scientific American*, 1991. <http://www.ubiq.com/hypertext/weiser/SciAmDraft3.html>
- YouTube, «Marvel ReEvolution: Augmented Reality Demo», 2012. <https://www.youtube.com/watch?v=rZJo19udwHU> (consultado el 15 de septiembre de 2016).
- YouTube, «Nissan Augmented Reality», 2010. <https://www.youtube.com/watch?v=Hv32V3EYaul> (consultado el 15 de septiembre de 2016).
- YouTube, «Steve Job Introduces iPhone in 2007», 2007. <https://youtu.be/MnrJzXM7a6o> (consultado el 15 de septiembre de 2016).



Cuando los robots gobiernen la Tierra: el legado humano

ROBIN HANSON

Imagen de apertura:
Zaha Hadid Architects
Interior del Heydar Aliyev Centre (2013)
Baku, Azerbaiyán



Robin Hanson

George Mason University, Fairfax, Vancouver, USA
Future of Humanity Institute of Oxford University, Oxford, Reino Unido

Robin Hanson es profesor asociado de Economía en la George Mason University e investigador asociado en el Future of Humanity Institute de la Oxford University. Tiene un doctorado en Ciencias Sociales por Caltech y sendos másteres en Física y Filosofía por la University of Chicago. Durante nueve años trabajó como investigador de inteligencia artificial en la empresa aeroespacial Lockheed y la NASA, y cuenta en su currículum con 3.175 citas, 60 publicaciones académicas, 500 menciones en medios de comunicación, 200 charlas como conferenciante invitado y ocho millones de visitas a su blog OvercomingBias.com. Oxford University Press publicó en junio de 2016 su libro *The Age of Em: Work, Love and Life when Robots Rule the Earth*, y en la primavera de 2017 publicará *The Elephant in the Brain*, escrito en colaboración con Kevin Simler.

Las tres grandes disrupciones en la historia han sido la llegada de los humanos, la agricultura y la industria. En algún momento del próximo siglo, de la inteligencia artificial podría surgir una disrupción similar en forma de emulaciones de cerebros o *ems*. A partir del consenso académico en muchas disciplinas, perfilo un escenario básico de un mundo inmediatamente posterior a un periodo de transición dominado por *ems*. Hablo de arquitectura, energía, enfriamiento, velocidad mental, tamaño corporal, estrategias de seguridad, realidad virtual, mercados de mano de obra, gestión, formación profesional, salarios, identidad, jubilación, ciclos vitales, reproducción, apareamiento, conversación, desigualdad, ciudades, tasa de crecimiento, políticas de coalición, gobernanza, derecho y guerra en un mundo automatizado.

INTRODUCCIÓN

Durante muchas décadas hemos tenido numerosos tipos de robots (y otros ayudantes basados en computadoras), pero adolecían de unas capacidades limitadas. Por ejemplo, si valoramos los trabajos en función de lo que pagamos por hacerlo, debemos deducir que los humanos siguen siendo mucho más valiosos que los robots, puesto que se les remunera más.

Sin embargo, son ya muchas décadas de progresión de las capacidades de los robots; una progresión lenta, pero mucho más rápida que el avance de las capacidades humanas. Por tanto, aunque tarde siglos en ocurrir, cabe esperar que los robots lleguen a superar a los humanos en prácticamente todas las tareas. Entonces, casi toda la remuneración por tareas irá destinada a los robots (o a sus propietarios). Sería este un mundo «dominado» por los robots, al menos en términos de quién hace la mayor parte del trabajo y quién toma la mayor parte de decisiones concretas que requieren una comprensión detallada del contexto. En cuanto a los humanos, quizás seguirían decidiendo sobre las grandes políticas abstractas, simbólicas y de alto nivel.

¿Qué podemos hacer hoy para influir en los acontecimientos de un futuro dominado por los robots? En primer lugar, abordo la cuestión general de cómo influir en el porvenir, para después centrarme en dos tipos de robots del futuro.





LA DIFICULTAD DE DEJAR UNA HERENCIA

Cuando la gente habla de un futuro lejano, suele incidir en lo que le gustaría que ocurriera. Entre los muchos escenarios futuros imaginables, ¿cuál prefiere? Se habla mucho de sus valores básicos, poco de las limitaciones prácticas que restringirían los escenarios factibles y menos aún de cómo podemos influir hoy en los resultados del mañana. Sin embargo, esta última cuestión, que a menudo se omite, parece clave: ¿cómo influir en el futuro? ¿Para qué pensar en qué queremos si no podemos cambiarlo?

Imagina que estás en la orilla de un río que desemboca en el mar, a muchos kilómetros de su origen. Desde el río, ves a una persona a quien aprecias que está en ese mismo río, pero cerca de la desembocadura en el mar, y quieres hacer algo en tu trecho de río para influir, de un modo u otro, en la persona que está corriente abajo. Aunque lo ideal sería conseguir un efecto benigno, para empezar te conformas con tener una influencia significativa.

Pero resulta bastante difícil. Puedes salpicar con el agua de alrededor, calentarla con una antorcha o tirar piedras al río. Pero los ríos tienden a ser sistemas estables que absorben estas distorsiones y enseguida recuperan su forma anterior. Incluso la construcción de una presa podría suponer solo un cambio temporal, revertido una vez que la presa se llenara y desbordara. Quién sabe si se podría lanzar río abajo una botella lo suficientemente resistente como para que no se rompiera en los rápidos del río. También podrías intentar desviar el río por un nuevo curso que no desemboque en el mismo punto del mar. Pero ninguna de estas soluciones es sencilla.

Tratar de influir en el futuro lejano se parece mucho a influir en un río corriente abajo, cuando está lejos de su fuente. Muchos aspectos de nuestro mundo constituyen sistemas estables a escala local que absorben las pequeñas distorsiones. Por ejemplo, si construyes un montículo, es posible que la lluvia se lo lleve. Del mismo modo, si abres una tienda de bocadillos en tu ciudad, puede que cierre otra tienda, con lo que el número de establecimientos quedaría inalterado.

En cualquier caso, lo cierto es que en el mundo hay muchos sistemas estables posibles, así que cabría la esperanza de dar a un sistema estable un «empujoncito» para que cambie y se estabilice con otra configuración, como en la analogía del cambio de curso del río. Por ejemplo, cabe la posibilidad de que, si hay bastantes clientes que comen en más sitios de bocadillos durante un tiempo, se aficionen al producto y lo pongan de moda, con lo cual habría mercado y lugar para nuevas tiendas de bocadillos. No obstante, las modas pueden ser volátiles, de manera que otra moda puede, a su vez, desplazar a los bocadillos en beneficio de otros productos de comida. Asimismo, puede resultar difícil identificar los sistemas estables y, todavía más, encontrarse cerca de un punto de inflexión en el cual un pequeño esfuerzo pueda comportar un gran cambio.

En política, la alianza de un conjunto de grupos puede ser, en cierta medida, estable. Por consiguiente, puedes intentar propiciar la formación de un nuevo conjunto de coaliciones que compartan tus tendencias políticas. También existe la opción de unirse a un movimiento social para luchar por la priorización de determinados valores en contextos sociales y políticos. Sin embargo, si estos valores responden a las circunstancias, pueden también formar parte de sistemas estables y, por tanto, resistirse al cambio. Sí, es probable que hayas asistido a cambios recientes en los valores expresados políticamente, pero quizá no son tanto la consecuencia de verdaderas transformaciones en los valores sino respuestas a cambios temporales de las modas y las circunstancias.



Algunas cosas se acumulan por naturaleza. Es el caso de muchas innovaciones (como los avances académicos y las decisiones de diseño técnico u organizativo) que son lo suficientemente generales y robustas como para conservar su valor más allá de los contextos sociales actuales. Si dichas innovaciones son también lo bastante grandes y sencillas, es posible que el mundo las acabe acumulando en gran cantidad. En tal caso, uno podría influir en el futuro añadiendo una innovación a la lista. Pero podría ocurrir que, de no haber hecho el descubrimiento, otra persona lo hubiera logrado un poco más tarde en nuestro lugar. En ese contexto, el futuro lejano no se presentaría muy distinto como resultado de nuestra aportación.

La economía mundial en su conjunto acumula (es decir, crece) sobre todo a través de la innovación. Podrías intentar ayudar a algunos de sus componentes a crecer más rápido que otros, pero, si existe un equilibrio natural entre componentes, las fuerzas correctoras podrían revertir nuestros cambios. Podrías intentar influir en la tasa global de crecimiento (por ejemplo, ahorrando más), aunque de ese modo quizás solo conseguirías que el mismo futuro llegara un poco antes.

Otra opción sería intentar ahorrar recursos y dedicarlos a un plan futuro. Esta podría ser una opción atractiva, en especial si tenemos en cuenta que, como casi siempre ha sucedido a lo largo de la historia, las tasas de rendimiento de la inversión han sido superiores a las tasas de crecimiento económico. En este caso, sin que deje de ser ínfima, tu influencia puede ser mayor en el futuro que en el presente, al menos si dispones de un modo fiable para influir en cómo se gastará en el futuro el rendimiento de nuestras inversiones.

Por ejemplo, podrías ahorrar e intentar vivir una larga vida; o elaborar un plan y aleccionar a tus hijos y nietos para que lo ejecuten. Podrías crear y financiar una organización longeva comprometida con unos fines específicos. De un modo análogo, podrías tratar de asumir el control de una institución de larga duración ya existente, como una iglesia o un gobierno, para conseguir que se comprometa con tu plan.

Si crees que hay muchas otras personas interesadas por lo mismos resultados que tú, pero que están luchando por otros objetivos empujados por incentivos individuales, tal vez puedas intentar coordinarte con ellos mediante contratos o instituciones más amplias. Por otra parte, si crees que la mayor parte del mundo está de acuerdo contigo, podrías incluso tratar de crear un gobierno más fuerte a escala mundial y hacer que se implique en tu plan. Aunque acuerdos como estos quizás sean difíciles de organizar.

Algunas cosas, como las piedras, los edificios o las constituciones, tienden a ser longevas por naturaleza. Cabría pues pensar que transformar algo así comportaría cambios a largo plazo. De entre las cosas que nos caracterizan, de las más duraderas son las maneras de coordinarnos los unos con los otros. Por ejemplo, nos coordinamos para vivir cerca de los mismos lugares, hablar las mismas lenguas y compartir las mismas leyes y los mismos gobiernos. Dado que modificar

estas cosas es difícil, los cambios logrados pueden durar más. Por la misma razón, no obstante, sería muy improbable que te encontraras en situación de influir de manera significativa en ese tipo de cuestiones.

En la biosfera, durante miles de millones de años el modo más común (con mucho) de influir en el futuro lejano ha consistido en esforzarse por tener hijos que crezcan y, a su vez, tengan más hijos. ¿Cómo se ha conseguido? Sobreviviendo, debilitando a los rivales, recolectando recursos, haciendo gala de buenas aptitudes para atraer parejas y criando hijos. Ese comportamiento ha sido la principal estrategia humana durante miles de años.

Este predominio abrumador de las estrategias biológicas habituales indica que, de hecho, constituyen vías de relativa eficacia para influir en un futuro lejano. Parece ser que las fuerzas correctivas que absorben distorsiones de este tipo son, en promedio, relativamente débiles. Tiene sentido si lo que hace nuestro complejo mundo está siempre tratando de coordinarse para corresponder a la complejidad que alberga en cada momento. En tal caso, cuanto más puedas llenar el mundo de elementos como tú, más intentará el mundo adaptarse para corresponderse con dichos elementos y, por tanto, más espacio dará, en un futuro lejano, a elementos que son como tú.

Destruir tiende a ser más fácil que crear, lo que nos empuja a buscar modos de alcanzar objetivos a largo plazo mediante la destrucción. Por suerte, los enfoques destructivos entran en conflicto, en parte, con los enfoques basados en «crear más elementos semejantes a nosotros». Sí, intentamos matar a nuestros rivales y en ocasiones las sociedades van a la guerra, pero en general la destrucción indiscriminada rara vez ayuda a que los individuos tengan descendencia.

Llegados aquí y habiendo revisado algunas cuestiones básicas sobre cómo influir en el futuro, ¿qué podemos decir sobre hacerlo en un futuro de robots?

ROBOTS TRADICIONALES

Las máquinas llevan varios siglos reemplazando a humanos en tareas laborales y, desde hace setenta años, muchas de ellas están controladas por ordenadores. Pese a que las capacidades brutas de estos ordenadores han mejorado a un ritmo exponencial de muchos órdenes de magnitud, el ritmo de sustitución de los empleos humanos ha permanecido reducido y relativamente constante. Es plausible que esta tendencia sea el producto de la enorme variación de los empleos humanos en cuanto al poder de computación necesario para desempeñarlos de un modo adecuado. Esto indica que la tasa de sustitución futura de empleos podría permanecer baja y relativamente constante incluso si la potencia de los ordenadores continúa mejorando de un modo exponencial de muchos más órdenes de magnitud.



La inteligencia artificial (IA) es un área de la investigación en computación cuyos expertos intentan entrenar a ordenadores para que lleven a cabo tareas que antes solo podían hacer humanos. Cuando los investigadores en IA han dado un paso más allá para presentar en público previsiones sobre el ritmo general de la investigación futura en esta materia (como promedio de todas las subáreas del IA), su estimación media predecía que se alcanzarían unas capacidades de nivel humano en alrededor de tres décadas. Esta estimación de treinta años ha permanecido constante durante más de cinco décadas, de modo que, a día de hoy, podemos decir que, en sus primeros veinte años, los pronósticos de este tipo estaban bastante errados. Por su parte, los investigadores, que en lugar de dar ese paso más allá se han limitado a responder encuestas, han añadido diez años a la estimación (Armstrong y Sotala 2012; Grace 2014).

No obstante, los expertos en IA son mucho menos optimistas cuando se les pregunta por aquellos temas sobre los que deberían saber más: el progreso reciente en la subárea de la IA que más dominan. En mis nueve años (1984-1993) de investigador profesional en IA he mantenido encuentros informales con otros expertos experimentados en IA y les he preguntado qué progresión habían notado en su subárea en particular durante los últimos veinte años. Suelen decir que solo han constatado entre el 5% y el 10% del progreso necesario para alcanzar capacidades de nivel humano en su subárea. También es habitual que no hayan observado una aceleración significativa de dicho progreso en este periodo (Hanson 2012). A este ritmo, cabe esperar que la subárea mediana de la IA tarde entre dos y cuatro siglos en alcanzar capacidades humanas. Me inclino más bien a creer en esta última estimación (en lugar de la habitual y presuntuosa de cuarenta años), puesto que se basa más directamente en información que estas personas dominan más.

Con todo, aunque tarden muchos siglos, es plausible que los robots acaben por hacer la práctica totalidad de trabajos necesarios. En ese momento, la tasa de crecimiento total de la economía podría ser muy superior: el volumen de la economía podría más o menos duplicarse cada mes, en lugar de cada quince años, como ocurre en nuestra era. Llegados a tal punto, los ingresos de los seres humanos no podrían proceder de su capacidad de trabajo, sino de otros activos, como las acciones, las patentes y la propiedad inmobiliaria. Pese a que el valor de los activos se debería duplicar tan rápido como la economía, los humanos que carecieron de los activos suficientes, de un seguro o de derecho a prestaciones públicas podrían morir de hambre.

En principio, a partir de un mundo dominado por los humanos podría evolucionar, de un modo gradual, un mundo futuro dominado por los robots. La lenta sustitución del trabajo humano por máquinas no requiere un cambio excesivo de la naturaleza, las divisiones y la distribución básicas de las ciudades, los países, las industrias, las profesiones y las empresas. Es decir, las máquinas podrían encajar en las casillas sociales antes ocupadas por los humanos. Huelga decir que, cuando menos, las industrias que antes educaban y formaban a los humanos serían reemplazadas por nuevas industrias que diseñarían, mantendrían y fabricarían robots.

Sin embargo, podría también haber cambios mucho mayores en la organización de una sociedad robótica si, como parece plausible, las máquinas fueran lo bastante diferentes de los humanos, en términos de costes relativos o productividad, como para volver eficientes unos sistemas sustancialmente distintos. Un modo razonable de estimar los costes, la productividad y las estructuras a gran escala de una sociedad de robots es observar la distribución de características similares en el *software* que hemos creado y usado durante muchas décadas. Aunque es posible que el *software* del mañana parezca muy distinto del existente hasta ahora,



a falta de buenas razones para esperar determinados tipos de cambios, puede que el *software* conocido sea aún la mejor pista del *software* por conocer. Por consiguiente, resulta razonable esperar que la estructura de una sociedad de robots se asemeje a la estructura de nuestro sistemas de *software* más grandes; en especial, aquellos extendidos por muchas empresas de muchos sectores distintos.

¿Cómo se puede intentar influir en un futuro robótico así? Un enfoque directo consistiría en acumular recursos y confiárselos a las organizaciones adecuadas. Por ejemplo, si solo quisieras influir en el futuro para conseguir comodidad y felicidad para ti y tus descendientes, podrías intentar vivir mucho tiempo y guardarte tus recursos, o bien dárselos a tus descendientes para que los gasten como quieran.

Tal vez, te desagrada la naturaleza o la estructura generales que, probablemente, tendría una sociedad robótica en un mundo descentralizado con escasa coordinación mundial. En este caso, si compartes este sentimiento intenso con un número de personas suficiente, puedes intentar promover unas instituciones políticas a gran escala y alentarlas a adoptar unas normas lo suficientemente restrictivas. Con una supervisión lo bastante detallada de las vulneraciones de la ley y unos castigos lo bastante duros para aquellos juzgados culpables, dichas normas podrían forzar los cambios deseados. Si los beneficios que las organizaciones pudieran obtener de sistemas más descentralizados tuvieran la magnitud suficiente, podría ser necesaria una regulación de ámbito mundial.

Sería plausible que las estructuras de la sociedad robótica del futuro surgieran de una evolución gradual en el tiempo, a partir de las estructuras más automatizadas de nuestra sociedad actual. En este contexto, cabría esperar que pudiéramos influir en las estructuras futuras mediante nuestras elecciones actuales de las estructuras de nuestra sociedad que hacen un uso más intensivo de ordenadores. Por ejemplo, si se prefiere que la sociedad robótica futura tenga unos mecanismos de seguridad relativamente descentralizados, se podría fomentar el desarrollo y la adopción, en la actualidad, de mecanismos de seguridad relativamente descentralizados. Asimismo, quien tema unos niveles elevados de concentración empresarial en un sector determinado de la futura sociedad robótica, puede intentar promover desde ahora unos niveles bajos de concentración de empresas en dicho sector.

ROBOTS BASADOS EN LA EMULACIÓN

Como explicaba, es posible que un mundo futuro esté repleto de robots similares a los que llevamos décadas fabricando. Sin embargo, también es posible, al menos durante un tiempo, llenar el futuro de robots muy distintos: las emulaciones cerebrales.

Las emulaciones cerebrales, conocidas también como «copias» o «ems», han sido una constante tanto de la ciencia ficción como del futurismo tecnológico desde hace décadas. Para hacer una emulación cerebral, se toma un cerebro humano, se escanea para registrar sus características y conexiones celulares concretas y a continuación se elabora un modelo informático que procesa las señales de acuerdo con esas mismas características y conexiones. Una emulación lo bastante buena cuenta con un comportamiento general muy próximo al de su original humano en términos de señales de entrada-salida. Podríamos hablar con ella y convencerla de que hiciera trabajos útiles.



Al igual que los humanos, las emulaciones recordarían un pasado, serían conscientes de un presente e imaginarían un futuro. Las emulaciones pueden ser o estar felices o tristes, entusiastas o cansadas, temerosas o esperanzadas, orgullosas o avergonzadas, creativas o faltas de originalidad, compasivas o frías. Pueden aprender y tener amigos, amantes, jefes y colegas. Aunque sus características psicológicas pueden apartarse de la media humana, suelen estar cerca de su rango de variación.

Parece probable que las tres tecnologías necesarias para crear emulaciones —es decir, la computación, el escaneo y la modelización celular— estarán listas en el plazo aproximado de un siglo, mucho antes de la estimación anteriormente citada de dos a cuatro siglos para que los robots comunes hagan casi todos los trabajos. Por lo tanto, las emulaciones podrían aparecer en un momento con alta demanda de trabajadores humanos y, por tanto, con alta demanda de emulaciones que los sustituyan.

Recientemente publiqué un libro, *The Age of Em: Work, Love, and Life when Robots Rule the Earth* (La era Em. Trabajo, amor y vida cotidiana cuando los robots gobiernen el mundo, Oxford University Press, 2016), que ofrece una perspectiva pormenorizada de un mundo dominado por emulaciones, al menos en su forma inicial, la que haría aparición poco después de la transición a un mundo de emulaciones. A continuación voy a resumir algunos de esos pormenores.

Mi análisis de una era temprana de emulación plantea un panorama que para muchos resultará perturbador y desconocido. La población de emulaciones no tardaría en dispararse hacia cifras de billones, lo que reduciría los sueldos a niveles cercanos a la subsistencia, con las emulaciones dedicando casi todas sus horas de vigilia a trabajar y a la economía, duplicando su producción a intervalos de un mes o menos. La mayoría de emulaciones serían copias hechas a partir de solo un millar de humanos muy inteligentes, concienzudos y productivos. La mayoría de las emulaciones tendría una edad de productividad máxima de cincuenta o más años. Por añadidura, la mayor parte de emulaciones serían también copias fabricadas para efectuar una tarea a corto plazo y desaparecer al terminarla.

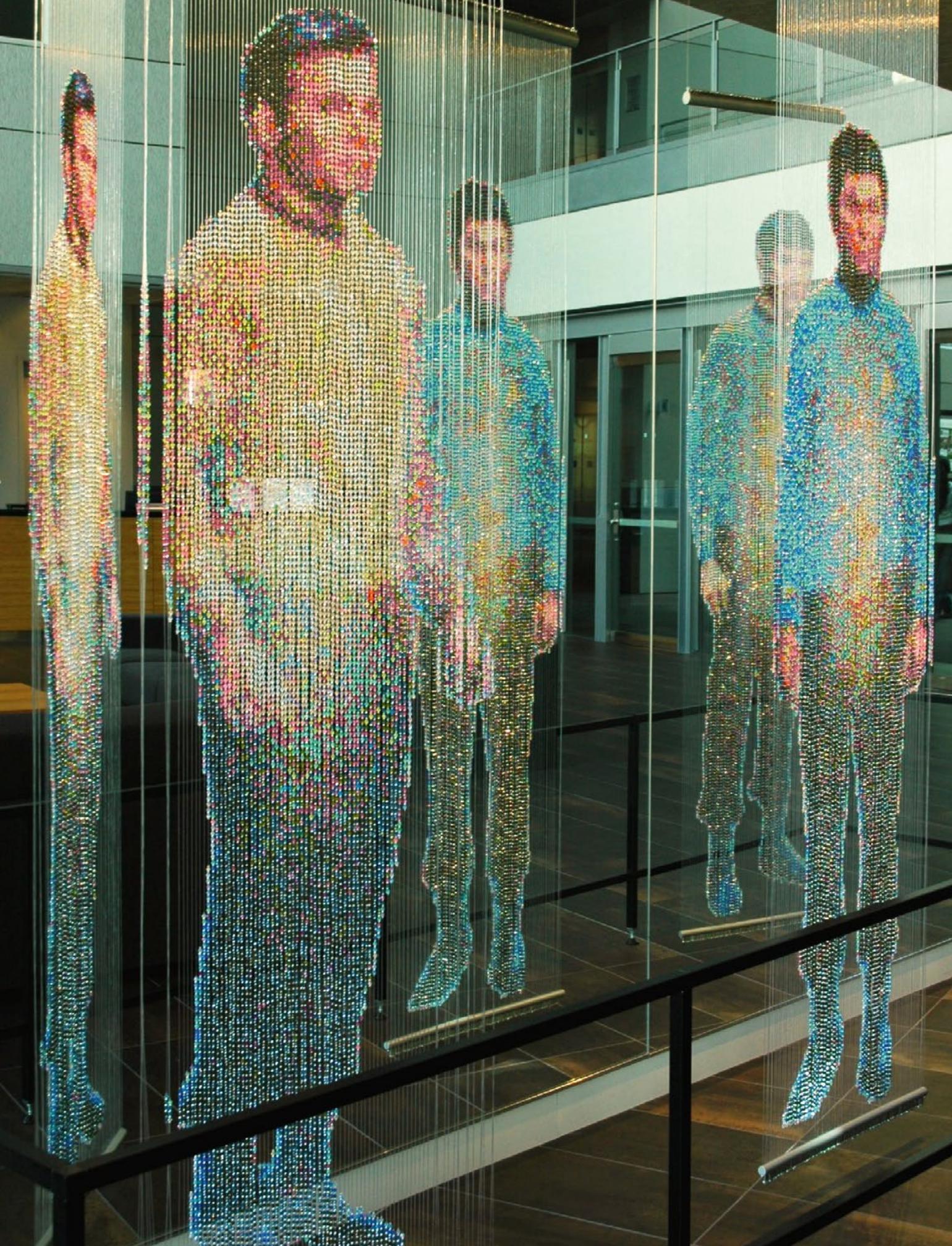
Las emulaciones se hacinarían en algunas ciudades de gran altura llenas a rebosar de *hardware* informático muy caliente y pasarían su tiempo libre en la realidad virtual, que para la mayoría sería también el lugar de trabajo. La realidad virtual de las emulaciones tendría una calidad espectacular y contarían con unos preciosos cuerpos virtuales siempre libres de hambre, frío, suciedad, dolor y enfermedades. Dado que la emulación típica funcionaría cerca



«Segunda estrella a la derecha, todo recto hacia el mañana.»

Kirk, uno de los personajes de la saga *Star Trek*, en *Star Trek VI. Aquel país desconocido* (1991)

La instalación de Devorah Sperber, que se encuentra en las oficinas del Studio D de Microsoft en Redmond, Washington, recrea imágenes del episodio «Espejo, espejito» de la serie *Star Trek. La serie original* (1967)





de mil veces más rápida que los humanos, su mundo les parecería más estable a ellas que el nuestro a nosotros.

Las emulaciones crearían copias propias que efectuarían tareas a corto plazo y desaparecerían después. Después de una carrera subjetiva de, quizás, un siglo o dos de duración, las mentes de las emulaciones habrían perdido flexibilidad y ya no competirían bien con las mentes más jóvenes. Estas emulaciones se podrían jubilar para dedicarse por tiempo indefinido a una vida de ocio a una velocidad más baja.

La facilidad para fabricar copias de emulaciones facilitaría la preparación. Una de ellas podría concebir un *software* o un diseño o visión artísticos y, acto seguido, multiplicarse en un ejército de emulaciones para ponerlos en práctica. Sería mucho más frecuente que, a pesar de superar el presupuesto previsto, los grandes proyectos se completaran dentro de su plazo, gracias a la aceleración de aquellas emulaciones encargadas de las partes más atrasadas de la obra. Se podría entrenar a una emulación para hacer un trabajo y, a partir de la emulación entrenada, hacer muchas copias. Por tanto, los mercados laborales de emulaciones se parecerían más a nuestros mercados de productos de hoy, dominados por algunos grandes proveedores.

Entre las emulaciones habría más desigualdad de la que existe en la actualidad, tanto por la variabilidad de sus velocidades como porque su mayor vida útil permitiría que se acumulara su desigualdad en resultados. Las emulaciones se dividirían entre castas en función de su velocidad, y las más veloces gozarían de un estatus más alto. Por otra parte, es probable que las democracias de emulaciones se sirvieran del voto ponderado según la velocidad y que sus dirigentes funcionaran a una velocidad mayor que sus subordinados, lo que facilitaría la coordinación de organizaciones de mayor magnitud. De igual manera, las organizaciones de emulaciones podrían también aplicar nuevos métodos de gobierno, como los mercados de decisión y las subastas combinatorias.

Cada emulación se sentiría muy apegada a su clan de copias, todas ellas descendientes del mismo humano original. Los clanes de emulaciones podrían autogobernarse y negociar con otros clanes las normas jurídicas a aplicar en caso de disputa entre sí. De igual manera, dichos clanes podrían brindar a los suyos un asesoramiento continuo basado en las experiencias vitales de miembros del clan similares.

Para permitir relaciones románticas en un contexto de demanda desigual de emulaciones trabajadoras macho y hembra, el género menos demandado podría funcionar a menor velocidad y acelerarse periódicamente para conocer a compañeros más rápidos. Las emulaciones rápidas con un cuerpo físico de tipo robótico tendrían cuerpos proporcionalmente más pequeños. Una emulación con una velocidad típica de mil veces la del ser humano tendría dos milímetros de altura y, desde su punto de vista, la Tierra parecería mucho más grande. En cuanto a los viajes físicos a larga distancia, en su mayor parte consistirían en viajes electrónicos mediante teletransportador, como en *Star Trek*, con el debido cuidado para evitar el robo de mentes.

Las ciudades de emulaciones probablemente serían poco habitables para los humanos ordinarios, quienes, al controlar la mayor parte del territorio restante del planeta, vivirían en su mayoría una cómoda jubilación gracias a las ganancias de sus inversiones en la economía de las emulaciones. Pese a que las emulaciones mismas gozarían de sobrada capacidad para comprar el resto de la Tierra, ni siquiera se lo plantearían, más allá de garantizar el suministro de energía, materias primas y refrigeración para las ciudades de emulaciones. Del mismo modo que los



humanos raramente ejecutamos a nuestros jubilados y les arrebatamos sus posesiones, es razonable esperar que las emulaciones tal vez dejen en paz a la humanidad una vez inactiva.

Es probable que, a largo plazo, el principal peligro tanto para los humanos como para la naturaleza fuera la inestabilidad de la civilización de las emulaciones, en forma de guerras o revoluciones. Las emulaciones, que funcionarían mil veces más rápido que los humanos, podrían reproducir unos cuantos milenios de historia en unos pocos años naturales. Como las lentas emulaciones jubiladas afrontarían unos riesgos similares, serían aliados que ayudarían a los humanos a promover la estabilidad en la nueva civilización.

EL LEGADO EN LOS ROBOTS EMULADORES

Hasta ahora, he abordado con brevedad algunas de las principales vías para influir en un futuro robótico en general. ¿En qué cambia esta situación en cuanto a los robots basados en emulaciones?

La diferencia más evidente es que, dado que cada emulación es el resultado de escanear un humano en concreto, los humanos pueden tener la expectativa de ejercer una gran influencia sobre la emulación resultante de su propio escaneo. Los padres y abuelos de dichos humanos podrían, asimismo, guardar también esperanzas en este sentido. Este tipo de influencia es bastante similar a la resultante de la estrategia típica y hasta ahora muy efectiva en la biosfera: promover la existencia de futuros seres que compartan muchas de nuestras características.

Otra gran diferencia sería que, dado que las emulaciones se asemejan mucho a los humanos, su inserción en las diversas posiciones sociales de la sociedad humana anterior podría ser mucho más fácil y directa. Cuando lleguen las emulaciones, hay razones para esperar menos cambios inmediatos y a gran escala en la naturaleza, las divisiones y la distribución básicas de las ciudades, los países, las industrias, las profesiones y las empresas. En consecuencia, resulta plausible que las inversiones actuales para influenciar ese tipo de instituciones sociales puedan gozar de una mayor longevidad durante la era de las emulaciones. Sin embargo, en el mundo de las emulaciones, los sistemas y las instituciones sociales también serían susceptibles de cambiar con el paso del tiempo, del mismo modo que habrían cambiado con el tiempo si los humanos hubieran seguido dominando la Tierra.

Cabe esperar, pues, que durante la era de las emulaciones, los robots emuladores sigan desarrollando las capacidades de los robots tradicionales, no basados en emulaciones. Al final, estos últimos podrían alcanzar capacidades superiores a las de las emulaciones en casi todos los trabajos. Esto marcaría, quizás, el fin de la era de las emulaciones. Que los robots tradicionales acabaran por sustituir a las emulaciones es menos obvio que la sustitución de los humanos; no en vano, las emulaciones tienen

más posibilidades de progresar con el tiempo que nosotros. En todo caso, la sustitución de las emulaciones por parte de los robots tradicionales parece un escenario a considerar.

En comparación con una rápida sustitución de los humanos por los robots tradicionales, un escenario en el cual las emulaciones sustituyeran primero a los humanos para, después, ser a su vez sustituidas por los robots clásicos parecería más proclive a otorgar a los humanos de nuestra era un mayor impacto sobre el futuro lejano. Esto se debe a que el primer escenario contiene una transición más traumática, con una mayor probabilidad de que los sistemas sociales existentes sean reemplazados de A a Z por otros más adecuados para los robots tradicionales. Por el contrario, el segundo escenario parece más susceptible de un cambio gradual que herede más estructuras procedentes de los sistemas de hoy.

A medida que avance la economía de las emulaciones, es probable que tenga cada vez más éxito a la hora de encontrar modificaciones mayores y más útiles de los cerebros emulados. Sin embargo, las modificaciones que se buscarían serían, sobre todo, aquellas que pudieran incrementar la productividad de las emulaciones en sus trabajos y las relaciones ya existentes. Asimismo, dado que es probable que la mayoría de modificaciones sean pequeñas, las mentes de las emulaciones, sus empleos y otras relaciones sociales evolucionarían de un modo gradual hacia nuevos sistemas.

En cuanto a las grandes modificaciones cerebrales de las emulaciones, es muy posible que fueran acompañadas tanto de una capacidad mejorada para separar con éxito las distintas partes de los cerebros de las emulaciones como de mejores teorías sobre su funcionamiento. Los desarrolladores de los robots tradicionales se verían, pues, alentados a incluir en estos más subsistemas semejantes a partes del cerebro de las emulaciones, que encajarían de un modo más fácil y natural en la economía de las emulaciones.

En definitiva, una transición desde las emulaciones hasta los robots tradicionales podría resultar menos traumática y más progresiva, al incluir y dar continuidad a más elementos de las mentes de las emulaciones y a sistemas más amplios propios de su sociedad. Puesto que, a su vez, una sociedad de emulaciones habría dado continuidad a más sistemas propios de la sociedad humana anterior, los humanos de hoy y nuestros sistemas nos enfrentaríamos a una trayectoria más progresiva de cambio futuro. De este modo, gozaríamos de más vías para influir en el mañana y daríamos pie a un futuro más conforme a las personas e instituciones de hoy.





BIBLIOGRAFÍA

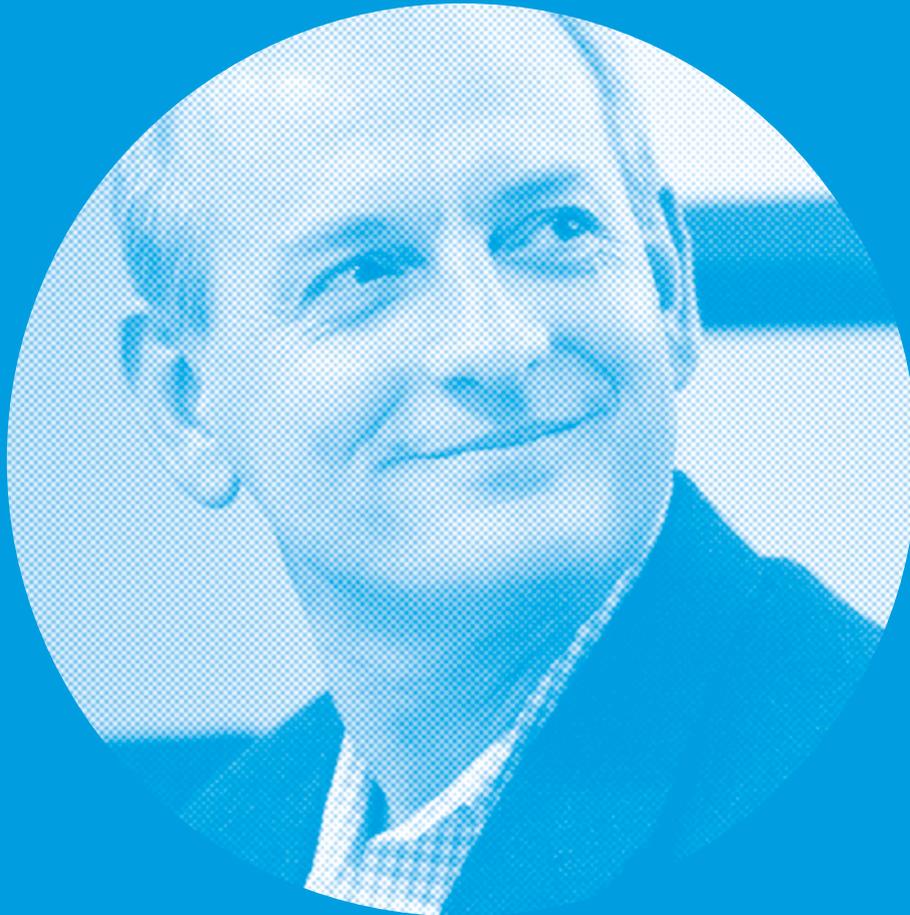
- Armstrong, S. y Sotala, K., «How We're Predicting AI—or Failing to», en Romportl, J., Ircing, P., Zackova, E., Polak, M. y Schuster, R. (eds.), *Beyond AI: Artificial Dreams*, Pilsen, Universidad de Bohemia Occidental, 2012, pp. 52-75.
- Grace, K., «MIRI AI Predictions Dataset», en AI Impacts, 20 de mayo de 2014. <http://aiimpacts.org/miri-ai-predictions-dataset/>
- Hanson, R., «AI Progress Estimate», en el blog *Overcoming Bias*, 27 de agosto de 2012. <http://www.overcomingbias.com/2012/08/ai-progress-estimate.html>



Inteligencia artificial de beneficios probados

STUART RUSSELL

Imagen de apertura:
Vídeo de la banda pionera de música electrónica alemana Kraftwerk durante su actuación en la inauguración de su exposición retrospectiva *Catalogue 12345678* en el Turbine Hall de la Tate Modern el 6 de febrero de 2013 en Londres, Reino Unido



Stuart Russell

University of California, Berkeley, California, EEUU

Licenciado con matrícula de honor en Física en Oxford en 1982, tras doctorarse en Ciencias Informáticas en Stanford en 1986, se unió al claustro de la University of California en Berkeley. Es profesor de Ingeniería Electrónica y Ciencias Informáticas y titular de la cátedra de ingeniería Smith-Zadeh. Es miembro de las asociaciones AAAI (Association for the Advancement of Artificial Intelligence), ACM (Association for Computing Machinery) y AAAS (The World's Largest Scientific Society); ganador del Computers and Thought Award y del ACM Karl V. Karlstrom Outstanding Educator Award. Entre 2012 y 2014 fue titular de la cátedra Blaise Pascal y catedrático de excelencia de la ANR (Association Nationale de la Recherche) en París. Su libro *Inteligencia artificial. Una nueva síntesis*, en colaboración con Peter Norvig, es el texto de referencia en inteligencia artificial, ha sido traducido a 13 idiomas y se usa en más de 1.300 universidades de 116 países.

¿Deberían preocuparnos los riesgos a largo plazo de la inteligencia artificial superinteligente? En caso afirmativo, ¿qué podemos hacer al respecto? Aunque parte de la comunidad mayoritaria de la inteligencia artificial ignora estas preocupaciones, yo argumentaré que es necesaria una reorientación fundamental del campo. En lugar de construir sistemas que optimicen objetivos arbitrarios, necesitamos aprender a construir sistemas que nos resulten probadamente beneficiosos. Demostraré la utilidad de dotar a los sistemas de incertidumbre explícita referida respecto a los objetivos de los humanos a los que tienen que ayudar, pues para ello han sido diseñados.

INTRODUCCIÓN

El objetivo de la investigación en inteligencia artificial (IA) ha sido comprender los principios que subyacen en el comportamiento inteligente y aplicarlos a la construcción de máquinas capaces de presentar dicho comportamiento. En los 50 años de vida de la disciplina se han buscado distintas definiciones de «inteligente», incluida la emulación del comportamiento humano y la capacidad de razonamiento lógico. En décadas recientes, sin embargo, ha surgido un consenso en torno a la idea de un *agente racional* que percibe y actúa para alcanzar sus objetivos al máximo. Subcampos como la robótica y el procesamiento de lenguajes naturales pueden entenderse como casos especiales del paradigma general. La IA ha incorporado la teoría de la probabilidad a la gestión de la incertidumbre, la teoría de la utilidad para definir objetivos y el aprendizaje estadístico para ayudar a las máquinas a adaptarse a circunstancias nuevas. Estos progresos han creado fuertes vínculos con otras disciplinas que aplican conceptos similares, incluidas la teoría del control, la economía, la investigación de operaciones y la estadística.

Los progresos en IA parecen acelerarse. En los últimos años, debido en parte a los avances en el aprendizaje de las máquinas, tareas como el reconocimiento de voz, la identificación de objetos, la locomoción bípeda y la conducción autónoma se han resuelto en gran medida. Cada nueva destreza alcanzada trae consigo nuevos mercados potenciales y nuevos incentivos para seguir invirtiendo en investigación, lo que conduce a un ciclo virtuoso que impulsa la IA. En la próxima década es probable que asistamos a progresos sustanciales en comprensión efectiva del lenguaje, lo que conducirá a sistemas capaces de ingerir, sintetizar y contestar preguntas sobre la suma total del conocimiento humano.

A pesar de todos estos avances, seguimos lejos de la IA a nivel humano. Por ejemplo, no disponemos de métodos prácticos para inventar conceptos útiles como «electrón» o nuevas





acciones útiles de alto nivel como «preparar diapositivas para la clase de mañana». Esta última destreza es especialmente importante para sistemas que operan en el mundo real, donde los objetivos que importan pueden requerir miles de millones de acciones básicas de control motor. Sin la capacidad de concebir ni razonar sobre acciones nuevas de alto nivel, son imposibles la planificación y la actuación en las escalas temporales que se manejan. Sin duda son necesarios más avances que no sabremos describir hasta que nuestros esfuerzos por construir sistemas IA polivalentes fracasen de maneras interesantes. La dificultad de predecir estos avances implica que dar una estimación precisa de la fecha en la que la IA alcanzará el nivel humano es imprudente. Sin embargo, la mayoría de expertos cree que es probable que ocurra en el presente siglo (Müller y Bostrom 2016; Etzioni 2016).

Es difícil exagerar la importancia de un acontecimiento así. Todo lo que ofrece nuestra civilización es consecuencia de la inteligencia; por tanto, el acceso a una inteligencia sustancialmente mayor supondría una discontinuidad en la historia de la humanidad. Podría conducir a soluciones de problemas como la enfermedad, la guerra y la pobreza; al mismo tiempo, varios observadores han señalado que los sistemas de IA superinteligentes pueden, por su propia naturaleza, tener impactos a escala global que podrían ser negativos para la humanidad de no estar bien diseñados.¹ La clave está en definir el problema que nuestros sistemas de IA tienen que resolver, para que podamos garantizar nuestra satisfacción con los resultados. Y lo que nos jugamos es mucho.

RIESGOS Y REFUTACIONES

Las preocupaciones que suscita la IA superinteligente no son algo nuevo. Turing mismo, en una comunicación por radio de 1951, sintió la necesidad de apuntar la siguiente posibilidad: «Si una máquina puede pensar, es posible que piense de manera más inteligente que nosotros, y entonces ¿dónde nos coloca eso? Incluso si pudiéramos relegar a las máquinas a una posición de servidumbre, por ejemplo desenchufándolas en momentos estratégicos, deberíamos, como especie, extraer una lección de humildad [...] Este nuevo peligro [...] es, sin duda, algo que puede causarnos preocupación». Irving. J. Good (1965), que había trabajado con Turing durante la Segunda Guerra Mundial, fue más allá y apuntó la posibilidad de sistemas de IA que se automejoran. «Habría entonces, indudablemente, una “explosión de inteligencia”, y la inteligencia del hombre quedaría muy atrás.» El *problema del control de la IA*, por tanto, es cómo asegurarse de que los sistemas con un grado arbitrariamente alto de inteligencia permanecen bajo estricto dominio humano.

Parece razonable ser cauteloso a la hora de crear algo mucho más inteligente que nosotros mismos; sin embargo, necesitamos algo más que una sensación de inquietud generalizada para reconducir de manera correcta la despiadada presión científica y económica a la hora de

construir sistemas cada vez más capaces. Muchas novelas y películas han trasladado esta inquietud a escenarios de máquinas conscientes espontáneamente malvadas, algo que es muy improbable y, como fenómeno técnico a evitar, imposible de abordar. De hecho, en la medida en que comprendemos el problema, la fuente de dificultades más probable parece ser un fracaso en el *alineamiento de valores*; a saber, que es posible que, sin darnos cuenta, dotemos a las máquinas de objetivos que no se alinean correctamente con los nuestros. Norbert Wiener (1960) lo expresó así: «Si usamos para nuestros fines una agencia mecánica en cuyo funcionamiento no podemos interferir de manera efectiva [...] debemos asegurarnos de que el propósito que damos a la máquina es el que de verdad deseamos».

Por desgracia, ni la IA ni otras disciplinas construidas alrededor de la optimización de objetivos (economía, estadística, teoría del control e investigación de operaciones) tienen gran cosa que decir sobre cómo identificar los propósitos que de verdad deseamos. En lugar de ello, asumen que los objetivos son simplemente implantados en la máquina. La IA estudia la capacidad de conseguir objetivos, no el diseño de estos. Y, como descubrió el rey Midas, conseguir lo que uno desea no siempre es bueno.

Nick Bostrom (2014) expone varios argumentos adicionales que sugieren que el problema no tiene soluciones fáciles. El más relevante para el análisis de este artículo lo debemos a Omohundro (2008), quien observó que entidades inteligentes tenderán a actuar de maneras que preserven su propia existencia. Esta tendencia no tiene nada que ver con el instinto de autoconservación ni otros conceptos biológicos; simplemente, una entidad no puede lograr sus objetivos si está muerta. Esto significa que la ya citada confianza de Turing en la posibilidad de apagar la máquina no procede. Según la argumentación de Omohundro, una máquina superinteligente se las arreglará para anular la opción de apagado. Así pues, tenemos un horizonte de máquinas superinteligentes cuyas acciones son (por definición) impredecibles por parte de meros humanos, cuyos objetivos especificados de forma imperfecta e incompleta pueden entrar en conflicto con los nuestros y cuya motivación para preservar su propia existencia como vía para cumplir esos objetivos puede resultar insuperable.



Estos argumentos han despertado una serie de objeciones, en especial por parte de investigadores de IA. Las objeciones son reflejo de una actitud defensiva natural, unida tal vez a una falta de imaginación sobre lo que podrían hacer las máquinas superinteligentes. Nadie parece dispuesto a estudiar esto con detenimiento (si a simple vista alguna de las objeciones se antoja absurda, puedo asegurar que las hay más absurdas aún y que las omito para no avergonzar a sus autores). Varias de estas objeciones figuran en el reciente Informe AI100 (Stone *et al.* 2016), mientras que otras las hacen individuos que participan en paneles de debate en congresos de IA:

«La inteligencia artificial a nivel humano, es decir, similar a la humana, es imposible», se trata de una afirmación chocante cuando la hacen investigadores de IA que, desde tiempos de Turing, han tenido que rebatir aseveraciones similares por parte de filósofos y matemáticos. La afirmación, que no está fundamentada en argumentos ni en pruebas, parece admitir que si la IA superinteligente *fuera* posible, *supondría un* riesgo significativo. Es como si un conductor de autobús, con la humanidad entera como pasajeros, dijera: «Sí, estoy conduciendo hacia un precipicio, pero confiad en mí, ¡nos quedaremos sin gasolina antes de llegar!». La afirmación también supone una apuesta temeraria en contra del ingenio humano. En el pasado, hemos hecho apuestas semejantes a estas y hemos perdido. El 11 de septiembre de 1933, el famoso físico Ernest Rutherford afirmó, con gran seguridad: «Quien espere obtener una fuente de energía de la transformación de estos átomos es que está en la luna». El 12 de septiembre de 1933, el físico Leó Szilárd inventó la reacción nuclear en cadena inducida por neutrones. Unos años después, tras haber demostrado esta reacción en su laboratorio, Szilárd escribió: «Desenchufamos todo y nos fuimos a casa. Aquella noche tuve pocas dudas de que el mundo se dirigía hacia el sufrimiento».

«Es demasiado pronto para preocuparse por ello.» El momento de preocuparse por un problema potencialmente serio para la humanidad no depende de cuándo se producirá dicho problema, sino de cuánto tiempo se necesita para idear e implementar una solución que lo evite. Por ejemplo, si tuviéramos que detectar un asteroide de gran tamaño que se predice que va a colisionar con la Tierra en 2066, ¿diríamos que es demasiado pronto para preocuparnos? Y si consideramos los peligros catastróficos globales del calentamiento humano que se cree que sobrevendrán a finales del presente siglo, ¿es prematuro emprender acciones para prevenirlos? Al contrario, puede ser demasiado tarde. La escala temporal pertinente para la IA a nivel humano es menos predecible, pero en absoluto eso quiere decir que, al igual que la fisión nuclear, pueda llegar bastante antes de lo esperado.

«Es como preocuparse por la superpoblación en Marte» es una variación interesante de la afirmación «Es demasiado pronto para preocuparse» y que trae a la cabeza una analogía especialmente pertinente: no solo se trata de un riesgo muy futuro y de fácil gestión, también es extremadamente improbable que intentemos trasladar a miles de millones de personas a Marte. Sin embargo, la analogía es falsa. *Ya estamos* dedicando recursos científicos y técnicos ingentes para crear sistemas de IA cada vez más capaces. Así que un plan para trasladar la raza humana a Marte sin pensar antes en lo que respiraríamos, beberíamos o comeríamos al llegar allí, sería una analogía más adecuada.

«La IA a nivel humano no es una realidad inminente, así que no debemos preocuparnos». Es otra variación de «demasiado pronto para preocuparnos», pero que atribuye las preocupaciones sobre el control de la IA a la falsa creencia de que la IA superinteligente es inminente. Esa objeción sencillamente confunde los motivos de preocupación, que no se basan



en la inminencia. Por ejemplo, Bostrom (2014), escribe: «En este libro no argumentamos en ningún momento que estemos en el umbral de un importante avance en IA, o que podamos predecir con ningún grado de precisión cuándo se producirá dicho avance».

«Nosotros somos los expertos, los que construimos los sistemas de IA; confiad en nosotros.» Esta objeción suele ir acompañada de una crítica a quienes plantean preocupaciones, acusándolos de ignorar la realidad de la IA. Aunque es cierto que algunos de los personajes públicos que han expresado preocupaciones, como Elon Musk, Stephen Hawking y Bill Gates, no son expertos en IA, sí están familiarizados con el razonamiento científico y tecnológico. Y sería difícil argumentar que Turing (1951), Good (1965), Wiener (1960) y Minsky (1984) no están cualificados para hablar de IA.

«No sois más que luditas.» Musk, Gates, Hawking y otros (incluido, al parecer, quien esto firma) recibieron en 2015 el premio Ludita del año que concede la fundación para la Información sobre Innovación en las Tecnologías. Una definición de *ludita* que incluye a Turing, Wiener, Minsky, Musk y Gate, algunos de los principales contribuyentes al progreso tecnológico de los siglos XX y XXI resulta, cuando menos, peculiar. Además, el epíteto refleja una comprensión del todo errónea de la naturaleza de las preocupaciones planteadas y el propósito de hacerlas públicas. Es como si se acusara de *luditas* a los ingenieros nucleares si plantearan la necesidad de controlar la fisión. Algunos objetores también emplean el término «antiAI», que viene a ser como llamar «antifísicos» a los ingenieros nucleares. El propósito de comprender y prevenir los riesgos de la IA es asegurar que podemos hacer reales los beneficios. Bostrom (2014), por ejemplo, afirma que el éxito a la hora de controlar la IA dará lugar a una «trayectoria civilizadora que conduzca a un uso solidario y jubiloso de la parcela cósmica de la humanidad».

«Vuestras predicciones apocalípticas no tienen en cuenta los beneficios potenciales de la IA.» Si la IA no tuviera beneficios potenciales, no habría interés económico o social por impulsar su investigación, y por tanto no existiría el peligro de lograr una IA comparable a la humana. Esta objeción es como acusar a los ingenieros nucleares que trabajan en contención de no tener nunca en cuenta los beneficios potenciales de la electricidad barata. El triste hecho es que los beneficios potenciales de la energía nuclear no han conseguido materializarse, en gran medida, precisamente porque no se prestó la atención debida a los riesgos de contención en Three Mile Island y Chernóbil.

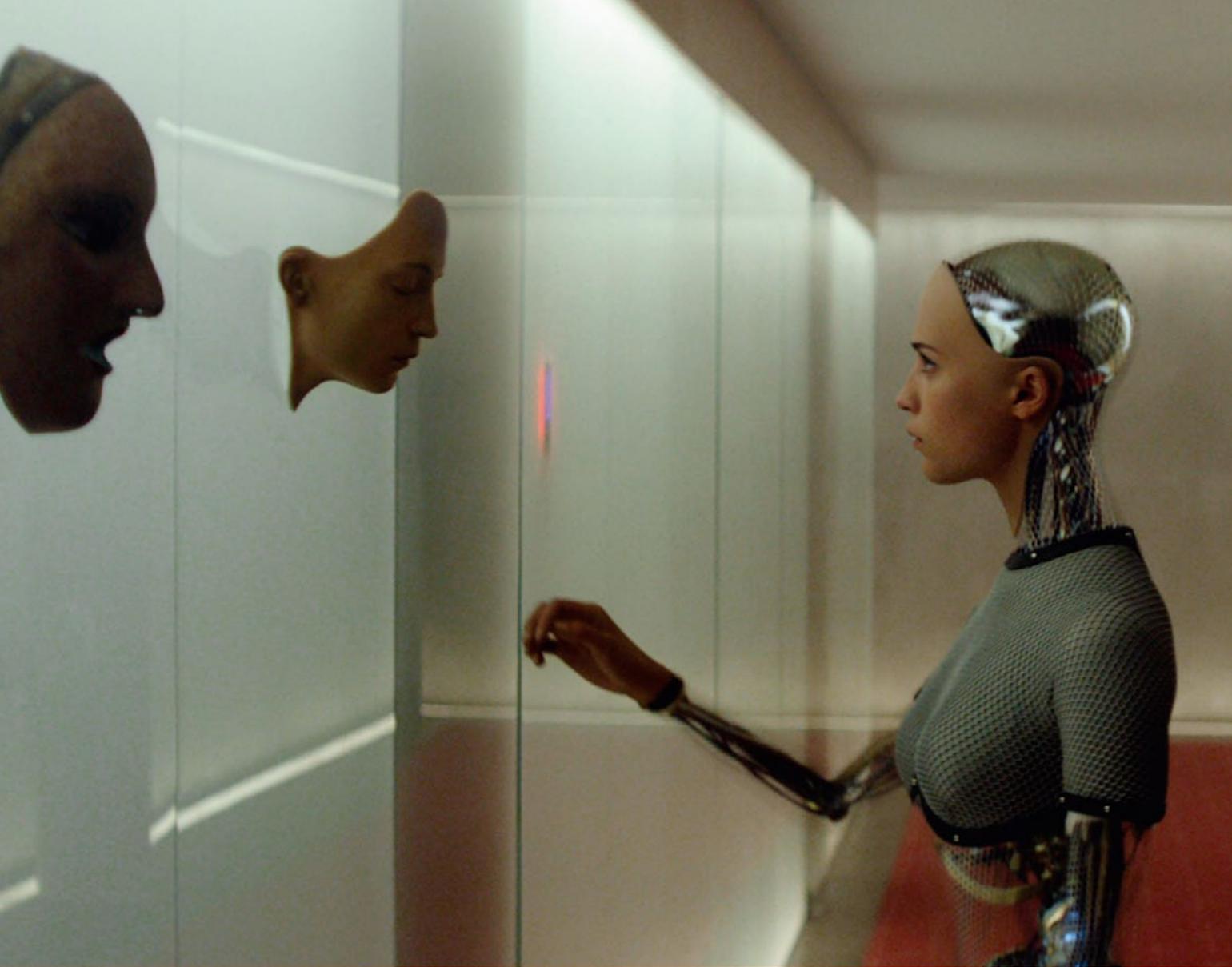
«No se puede controlar la investigación.» En la actualidad nadie sugiere que pueda limitarse la investigación sobre IA, solo que hay que prestar atención al problema de prevenir consecuencias negativas de sistemas mal diseñados. Pero, si es necesario, *podemos* controlar la investigación: no diseñamos genéticamente seres humanos porque los biólogos moleculares decidieron, en un taller celebrado en Asilomar en 1975, que sería una mala idea, aunque «mejorar las reservas de humanos» era, desde varias décadas antes, el objetivo de numerosos investigadores del campo de la biología.

«No conviene mencionar los riesgos, puede afectar la financiación.» Véanse energía nuclear, tabaco, calentamiento global.

Además de estas objeciones en el campo de las políticas a seguir, hay otras que proponen soluciones simples para evitar las consecuencias negativas de la IA superinteligente.

«En lugar de introducir objetivos en el sistema, dejar que elija los que quiera.» No está nada claro cómo solucionaría esto el problema. Los criterios de acuerdo a los cuales un sistema de

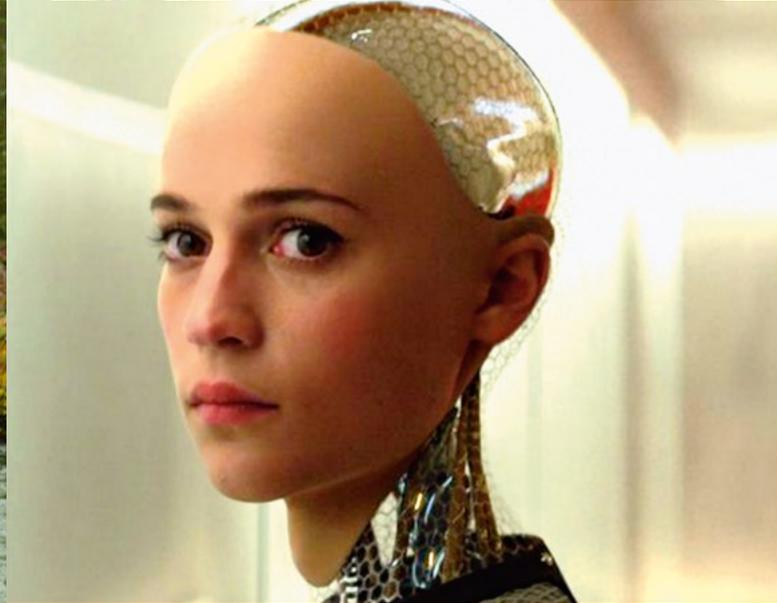




«El desafío no es actuar automáticamente. Es encontrar una acción que no sea automática. Pintar, respirar, hablar y enamorarse.»

ALEX GARLAND

Alex Garland, director y guionista, obtuvo el Oscar al mejor guion original por *Ex machina* (2015)



Ex machina (2015), Alex Garland

IA elegiría sus propios objetivos pueden muy bien considerarse metaobjetivos, y de nuevo nos enfrentamos al problema de cómo asegurar que conducen a comportamientos consistentes con el bienestar humano. Tenemos que rectificar el timón, no tirarlo por la borda.

«Los humanos más inteligentes tienden a tener objetivos más loables y altruistas, lo mismo ocurrirá con las máquinas superinteligentes.» Más allá del hecho de que quienes defienden este argumento se consideran más listos que la mayoría, hay, de hecho, escasísimas pruebas de la validez de la premisa de este argumento, y la premisa no proporciona apoyo ninguno a la conclusión.

«No os preocupéis, tendremos equipos humanos-IA que trabajarán en colaboración.» Una mala alineación de los valores impide trabajar en equipo, así que esta solución pasa por contestar antes a la pregunta de cómo solucionar el problema central de alineamiento de valores.

«No hay que incluir en la ecuación objetivos humanos como la autoconservación.» Véase la reflexión sobre el argumento de Omohundro anterior. Para un robot que sirve cafés, la muerte no es algo malo en sí mismo. Pero sí algo a evitar, porque es complicado servir café si estás muerto.

«No pasa nada, se apaga y ya está.» Como si una entidad superinteligente no fuera a contar con esa posibilidad.

SOLUCIONES

Bostrom (2014) considera un número de propuestas técnicas más serias para resolver el problema de control de la IA. Algunos, bajo el encabezamiento de «oráculo de IA», proponen encerrar las máquinas en una suerte de cortafuegos y extraer de ellas trabajo útil tipo pregunta-respuesta, pero sin permitirles jamás intervenir en el mundo real. (¡Por supuesto que, esto implica renunciar a los robots superinteligentes!) Por desgracia, es poco probable que algo así funcione, pues todavía no hemos inventado un cortafuegos que actúe de manera segura contra simples humanos, y mucho menos contra máquinas superinteligentes. Otros hablan de restricciones probadamente aplicables al comportamiento, pero diseñarlas es como intentar escribir una ley fiscal sin resquicios (¡con evasores fiscales superinteligentes además!),

¿Podríamos, en lugar de ello, abordar la advertencia de Wiener? ¿Podemos diseñar sistemas de IA cuyos propósitos no entren en conflicto con los nuestros, de manera que nuestra satisfacción con su manera de comportarse esté asegurada? No es algo nada sencillo, pero puede ser factible si seguimos tres principios centrales:

1. *El propósito de la máquina es maximizar la puesta en práctica de valores humanos.* Más concretamente, no tiene un propósito propio ni un deseo innato de protegerse.
2. *La máquina tiene una incertidumbre inicial respecto a cuáles son esos valores humanos.* Esto resulta más crucial y, en cierto modo, elude el problema de Wiener. La máquina puede aprender más sobre valores humanos sobre la marcha, claro, pero es posible que nunca alcance total certidumbre.
3. *Las máquinas pueden aprender sobre valores humanos observando las elecciones que hacemos los humanos.*



Resulta que estos tres principios, una vez incardinados en un marco matemático formal que defina el problema que la IA está inherentemente obligada a resolver, parecen permitir ciertos progresos en el problema de control de la IA. En particular, al menos en casos simples, podemos definir una plantilla para diseños de agentes probadamente beneficiosos bajo determinados supuestos razonables (si no ciertos).

APRENDIZAJE DE FUNCIONES DE RECOMPENSA

Para explicar el marco matemático, ser algo más precisos con la terminología ayuda. Según Von Neumann y Morgenstern (1994), a cualquier agente racional puede atribuírsele una *función de utilidad* $U(s)$ que asigna un número real que representa la deseabilidad de existir en un estado del mundo particular cualquiera s . De modo equivalente, esta es la deseabilidad esperada de las posibles secuencias de estado futuras que empiezan por s , asumiendo que el agente actúa de forma óptima. (En investigación de operaciones, esto a menudo se conoce por *función de valor*, un término que tiene un significado distinto en economía.) Hay otra suposición posible de preferencias estacionarias (Koopmans 1972), según la cual la deseabilidad de una secuencia de estado cualquiera puede expresarse como una suma (que probablemente decrece con el tiempo) de *recompensas inmediatas* asociadas a cada estado de la secuencia. Por razones de conveniencia, la *función de recompensa* $R(s, a, s')$ se define de manera que sea la recompensa inmediata asociada a la transición del estado s al estado s' mediante la acción a . Por lo general, la función recompensa proporciona una manera concisa de definir una tarea; por ejemplo, la tarea de jugar al backgammon puede definirse especificando que la recompensa sea = para todos los estados no terminales s' y un número entre -192 y +192 para transiciones a estados terminales (el valor preciso dependerá del estado del cubo de doblar y de si el juego termina de una manera normal, con gammon o con backgammon). La *utilidad* de un estado de backgammon s , por otra parte, será en la mayoría de los casos una función muy compleja de s , porque representa una expectativa de secuencias de recompensa futuras respecto a todos los resultados posibles de los dados que se produzcan durante lo que queda de partida. Para una persona que está pasando un rato de disfrute en su jardín, las recompensas de oler una rosa pueden ser positivas (siempre que no la huela cien veces seguidas) y las de pincharse el dedo con las espinas negativas, mientras que la utilidad de estar en el jardín en ese momento dependerá de todas las recompensas futuras, y estas pueden variar enormemente en función de si uno está a punto de casarse, de cumplir una larga condena en la cárcel, etcétera.

En la medida en que sea posible *definir* de manera concisa *objetivos* especificando funciones de recompensa, el *comportamiento* puede explicarse de forma también concisa infiriendo funciones de recompensa. Esta es la idea clave que subyace en el llamado *aprendizaje por refuerzo inverso* (IRL, por sus siglas en inglés; Russell 1998; Ng y Russell 2000). Un algoritmo IRL aprende una función nueva observando el comportamiento de otro agente, del que se asume que actúa en consonancia con dicha función. El IRL es la forma secuencial de obtención de preferencias y está relacionado con el cálculo estructural de PDM (procesos de decisión de Márkov, en economía). Viendo a su dueño preparar café por la mañana, el robot doméstico aprende algo sobre la deseabilidad de tomar café en determinadas circunstancias, mientras que un robot de dueño inglés aprenderá sobre la deseabilidad de tomar el té en cualquier ocasión.





RESOLVER PROBLEMAS SENCILLOS DE CONTROL DE IA

Cabría imaginar que el IRL proporciona una solución sencilla al problema de alineamiento de valores: el robot observa el comportamiento humano, aprende la función de recompensa y se comporta de acuerdo a dicha función. Esta sencilla idea presenta dos problemas. El primero es obvio: el comportamiento humano (en especial por la mañana) a menudo transmite un deseo de tomar café, y el robot puede aprender esto, pero ¡no queremos que el robot quiera tomar café! Este defecto es fácil de solucionar; necesitamos reformular el problema de alineamiento de valores de manera que el robot siempre tenga el mismo objetivo de optimizar la recompensa para el humano (el principio 1 expuesto anteriormente) y se vuelva más capaz de hacerlo a medida que aprenda cuál es la función de recompensa humana.

El segundo problema es menos obvio y menos fácil de solucionar. Al humano le interesa asegurar que el alineamiento de valores se produzca de la forma más rápida y precisa posible, de forma que el robot pueda ser útil al máximo y se eviten errores potencialmente desastrosos. Sin embargo, actuar de forma óptima en la adquisición de café limitando al robot a un papel pasivo puede no ser la manera idónea de conseguir el alineamiento de valores. En lugar de ello, el humano tal vez debería explicar los pasos necesarios para preparar café, así como enseñar al robot dónde se guarda el café y qué hacer si se deja demasiado tiempo la cafetera encendida, mientras que el robot puede preguntar para qué sirve el botón de hacer espuma y probar a preparar café bajo la supervisión de un humano, incluso si los primeros resultados son imbebibles. Ninguna de estas posibilidades encaja en el marco del IRL.

Si se extiende el aprendizaje inverso por refuerzo de manera que incorpore como agentes tanto al robot como al humano, entonces es posible formular y solucionar un problema de alineamiento de valores, convirtiéndolo en un proceso de maximización de recompensa cooperativo e interactivo (Hadfield-Menell *et al.* 2017a). Más concretamente, un problema de *aprendizaje inverso cooperativo por refuerzo* (CIRL, por sus siglas en inglés) es una partida para dos jugadores con información parcial en la que el humano conoce la función de recompensa² y el robot no, pero la recompensa del robot es idéntica a la del humano. Por tanto, el CIRL encarna los tres principios enunciados anteriormente. Las soluciones óptimas a este juego maximizan la recompensa humana y pueden generar de forma natural instrucción activa por parte del humano y aprendizaje activo por parte del robot.

En el marco del CIRL, se puede formular y resolver el problema de desenchufar, es decir, el problema de evitar que un robot inutilice su botón de apagado. (Así Turing puede estar tranquilo.) Es seguro que un robot diseñado para resolver el problema del CIRL quiere maximizar valores humanos, pero también es seguro que no sabe con exactitud cuáles son. Ahora bien, el robot se *beneficia* de hecho de que lo apaguen porque

entiende que el humano pulsará el interruptor para evitar que el robot haga alguna cosa contraria a los valores humanos. Así, el robot tiene un incentivo positivo para respetar el interruptor de apagado y este incentivo deriva directamente de su incertidumbre respecto a los valores humanos. Además, es posible demostrar que en algunos casos el robot es *probablemente beneficioso*, a saber, la recompensa esperada por el humano es mayor cuando hay un robot capaz de resolver problemas de CIRL con independencia de cuál sea la función de recompensa real del humano (Hadfield-Menell *et al.* 2017b).

El ejemplo del interruptor de apagado sugiere algunas fórmulas para el diseño de agentes controlables y nos proporciona al menos un caso de sistema de beneficio probado. El enfoque general guarda cierta similitud con el diseño de mecanismos de resolución de problemas en matemáticas, donde uno trata de incentivar a otros agentes para que se comporten de maneras que sean probablemente beneficiosas para el diseñador del mecanismo. La diferencia fundamental es que aquí estamos *construyendo* a uno de los agentes para que beneficie al otro.

El ejemplo de apagado funciona debido al principio 2, es decir, que el robot debería tener incertidumbre respecto a la verdadera función de recompensa del humano. Por extraño que parezca, la incertidumbre respecto a la recompensa ha sido ignorada casi por completo en IA, a pesar de que la incertidumbre respecto al conocimiento del campo de acción y la interpretación de sensores ha sido una preocupación central durante veinte años. La razón puede ser que la incertidumbre respecto a la función de recompensa es irrelevante en problemas de decisiones secuenciales estándar (procesos de decisión de Márkov o MDP, MDP parcialmente observables o POMDP y problemas de control óptimo), porque la política óptima con una función de recompensa incierta es idéntica a la política óptima con una función de recompensa definida equivalente al valor esperado de la función de recompensa incierta. Sin embargo, esta equivalencia solo se mantiene cuando el entorno no proporciona ulterior información sobre la verdadera función de recompensa, que no es el caso de problemas de CIRL, donde las acciones humanas revelan información sobre preferencias humanas. Cuando el entorno sí puede proporcionar información adicional sobre la función de recompensa, los agentes con incertidumbre respecto a esta pueden presentar comportamientos que no podrían realizar sistemas de IA tradicionales con funciones de recompensa fijas.

En este punto, el lector familiarizado con el concepto de aprendizaje por refuerzo (RL, por sus siglas en inglés) podría aducir que la «señal recompensa» que recibe el agente RL después de cada transición estado-acción-estado *sí* proporciona información sobre la verdadera función de recompensa, porque da el valor real de $R(s, a, s')$ para la transición producida. Así pues, ¿podría el aprendizaje por refuerzo ordinario constituir una base para el alineamiento







de valores si el humano se limita a suministrar una señal de recompensa directamente al robot? ¡Por fortuna no! En primer lugar, el humano puede no ser capaz de cuantificar la recompensa de forma precisa, ni siquiera para transiciones específicas ya experimentadas. En segundo lugar, el modelo formal de RL asume que la señal de recompensa le llega al agente de *fuera* del entorno; pero el humano y el robot son parte del mismo entorno, y el robot puede maximizar su recompensa modificando al humano de manera que le proporcione en todo momento una señal de recompensa máxima. Lo indeseable de este resultado, conocido como *wireheading* o estimulación directa (Muehlhauser y Hibbard 2014), pone de manifiesto un error de base en la formulación estándar del RL. El error es que el entorno no puede proporcionar una *recompensa real* al agente; tan solo *información* sobre la recompensa. Así, un humano que emite una «señal de recompensa» al robot no le está dando una recompensa, sino proporcionándole pruebas (probablemente ruidosas) de sus preferencias en forma de una acción que selecciona un número. Esta nueva formulación evita claramente el problema de *wireheading* porque el robot solo *saldrá perdiendo* si modifica la fuente de información para enmascarar la señal subyacente. Y si la formulación estipula que el robot tiene que maximizar la función de recompensa *original*, entonces modificar al humano de manera que tenga una función de recompensa nueva más sencilla de maximizar no le hace ningún bien al robot.

CONSIDERACIONES PRÁCTICAS

He argumentado que el marco para el aprendizaje inverso por refuerzo puede ser el primer paso para una resolución teórica del problema de control en IA. Hay también razones para creer que el enfoque puede funcionar en la práctica. En primer lugar, hay ingentes cantidades de información escrita y filmada sobre humanos haciendo cosas (y otros humanos reaccionando). La tecnología necesaria para construir modelos de valores humanos a partir de estos archivos estará disponible mucho antes de que se creen sistemas de IA superinteligentes. En segundo lugar, existen incentivos muy poderosos y a corto plazo para que los robots entiendan los valores humanos: si un robot doméstico mal diseñado cocina al gato para cenar porque no entiende que su valor sentimental excede con mucho su valor nutricional, el sector de los robots domésticos quebrará. En el campo de los asistentes personales digitales, que probablemente se convertirá en un mercado importante antes de que termine la década, un asistente que se adapta con rapidez a las preferencias complejas y llenas de matices de su dueño presenta beneficios obvios.

Un enfoque basado en el aprendizaje de valores a partir del comportamiento humano, no obstante, plantea problemas evidentes. Los humanos son irracionales, incoherentes, pusilánimes y computacionalmente limitados, de manera que sus acciones no siempre reflejan sus valores (pensemos, por ejemplo, en dos humanos que juegan al ajedrez; por lo general uno de ellos pierde, ¡pero no adrede!). Los humanos también son diversos en cuanto a valores y circunstancias, lo que quiere decir que los robots deben ser receptivos a las preferencias individuales y mediar en conflictos de preferencias, un problema tanto para científicos sociales como para ingenieros. Y algunos humanos son malvados, así que el robot debe poder ser capaz de filtrar valores de sistemas individuales que sean incompatibles con el bienestar general.

Un miembro de Team Valor prueba el robot THOR durante la preparación del Desafío Robótico (Robotics Challenge) de DARPA, la agencia de investigación de proyectos avanzados de defensa en el TREC (laboratorio de ingeniería y control de robótica terrestre) del Virginia Tech



Parece probable que los robots puedan aprender de comportamientos humanos no racionales solo con la ayuda de modelos cognitivos de humanos muy mejorados. ¿Y qué pasa con el comportamiento indeseable? ¿Es posible evitar corromper a nuestros robots sin imponer limitaciones adquiridas (y que por tanto varían según las culturas) a los valores que estamos dispuestos a permitir? Tal vez se pueda usar una versión del imperativo categórico de Kant, según la cual una función de recompensa que asignara valor negligible o negativo al bienestar de los demás carecería de *autoconsistencia*, en el sentido de que si todos operaran con dicha función de recompensa, entonces ninguno la obtendría.

SÍNTESIS

He argumentado, siguiendo a numerosos autores, que encontrar una solución al problema de control de la IA es una tarea importante. Más concretamente y en las sonoras palabras de Bostrom, «la tarea esencial de nuestra época». También he argumentado que, hasta el momento, la IA se ha centrado en sistemas capaces de tomar mejor decisiones, pero que esto no es lo mismo que tomar decisiones mejores. Por muy excelentemente que maximice un algoritmo, y por muy preciso que sea su modelo del mundo, las decisiones de una máquina pueden ser estúpidas a los ojos de un humano normal y corriente si su función de utilidad no está bien alineada con los valores humanos.

Este problema exige cambiar la definición misma de IA, que debe dejar de ser un campo que se ocupa de la inteligencia pura, con independencia del objetivo, y ser uno que se ocupe de sistemas probadamente beneficiosos *para los humanos*. (Supongo que también podríamos diseñar sistemas de IA para otras especies, pero no creo que sea una prioridad ahora mismo.) Tomarse en serio el problema ha dado lugar a nuevas maneras de enfocar la IA, sus propósitos y nuestra relación con ella.

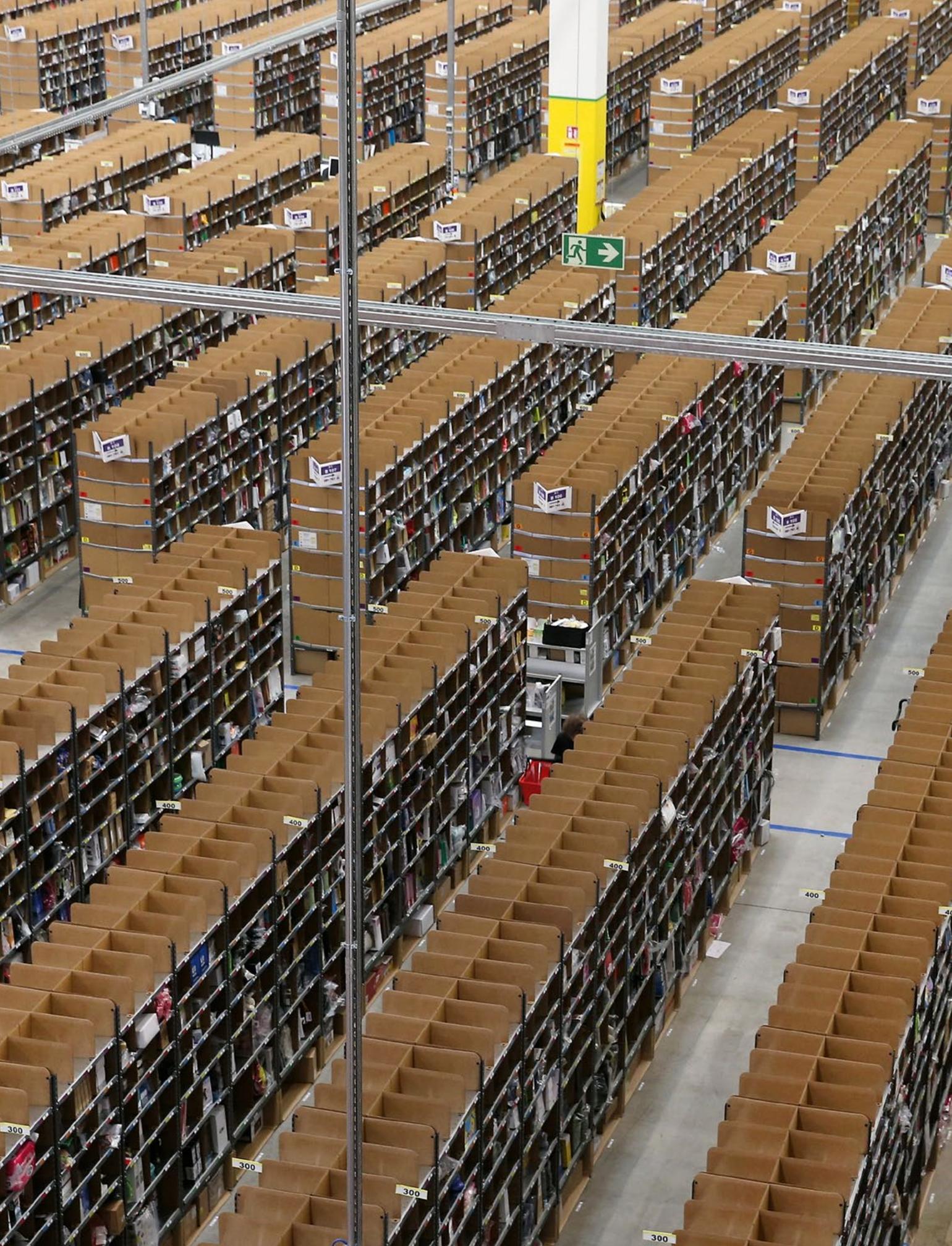


NOTAS

1. Existen otros posibles riesgos del uso indebido de una IA cada vez más potente, incluidos la vigilancia automática y la persuasión, las armas autónomas y la disrupción económica; deben ser estudiadas en profundidad, pero no son el tema del presente artículo.
2. Cabría preguntarse: ¿por qué un humano que conoce la función de recompensa no se limita a programarla en el robot? Aquí usamos «saber» en el sentido restringido de *como si* uno conociera la función de recompensa, sin ser necesariamente capaz de hacerla explícita. Es como cuando un humano «conoce» la diferencia de pronunciación entre la letra *g* en *gente* y en *guante* sin ser capaz de poner por escrito la regla ortográfica.

BIBLIOGRAFÍA

- Bostrom, N., *Superintelligence*, Oxford, Oxford University Press, 2014 [Ed. esp. *Superinteligencia*, Zaragoza, Teell, 2016].
- Etzioni, O., «Are the Experts Worried About the Existential Risk of Artificial Intelligence?», en *MIT Technology Review*, 2016.
- Good, I. J., «Speculations Concerning the First Ultra-intelligent Machine», en Alt, F. L. y Rubinfoff, M. (eds.), *Advances in Computers* 6, Nueva York, Academic Press, 1965.
- Hadfield-Menell, D., Dragan, A., Abbeel, P. y Russell, S., «Cooperative Inverse Reinforcement Learning», en *Advances in Neural Information Processing Systems 25*, Cambridge, Massachusetts, The MIT Press, 2017a.
- Hadfield-Menell, D., Dragan, A., Abbeel, P. y Russell, S., «The off-switch», en la 31ª Conferencia AAAI sobre Inteligencia Artificial (AAAI-17), 2017b.
- Koopmans, T. C., «Representation of Preference Orderings over Time», en McGuire, C. B. y Radner, R. (eds.), *Decision and Organization*, Amsterdam, Elsevier/ North-Holland, 1972.
- Minsky, M., «Afterword to Vernor Vinge's novel, "True Names"», manuscrito inédito, 1984.
- Muehlhauser, L. y Hibbard, B., «Exploratory Engineering in Artificial Intelligence», en *Communications of the ACM*, vol. 57, n.º 9, 2014, pp. 32-34.
- Müller, V. C. y Bostrom, N., «Future Progress in Artificial Intelligence: A Survey of Expert Opinion», en Müller, V. C. (ed.), *Fundamental Issues of Artificial Intelligence*, Berlín, Springer, Synthèse Library, vol. 376, 2016.
- Ng, A. Y. y Russell, S., «Algorithms for Inverse Reinforcement Learning», *Actas de la XVII Conferencia Internacional sobre Aprendizaje Automático*, Stanford, California, Morgan Kaufmann, 2000.
- Omohundro, S. M., «The Basic AI Drives», en *Proceedings of the First AGI Conference*, IOS Press, 2008.
- Russell, S., «Learning Agents for Uncertain Environments (extended abstract)», en *Proc. COLT-98*, Madison, Wisconsin, ACM Press, 1998.
- Stone, P. et al., «Artificial Intelligence and Life in 2030», en *One Hundred Year Study on Artificial Intelligence*, informe del Panel de Estudio 2015, Universidad de Stanford, septiembre de 2016.
- Turing, A. M., «Can digital Machines Think?», 1951. Conferencia retransmitida por la BBC, transcripción en inglés en turingarchive.org
- Von Neumann, J. y Morgenstern, O., *Theory of Games and Economic Behavior*, 1ª ed., Princeton, Princeton University Press, 1944.
- Wiener, N., «Some Moral and Technical Consequences of Automation», en *Science*, vol. 131, n.º 3.410, 1960, pp. 1.355-1.358.



Avance tecnológico: riesgos y desafíos

DARRELL M. WEST

Imagen de apertura:
Trabajadores entre estantes con artículos en un almacén de Amazon, en Brieselang, Alemania, el segundo mercado *online* más importante de Amazon después de EEUU



Darrell M. West
Brookings Institution, Washington D. C., EEUU

Darrell M. West es vicepresidente de Estudios de Gobernanza y director del Centro de Innovación Tecnológica de la Brookings Institution. Es titular de la cátedra Douglas Dillon Chair en Estudios de Gobernanza. Antes ocupó la cátedra John Hazen White de Ciencias Políticas y Legislación Pública en la Universidad de Brown. Es autor de 22 libros, entre ellos: *Megachange: Economic Disruption, Political Upheaval, and Social Strife in the 21st Century* (Brookings, 2016), *Billionaires: Reflections on the Upper Crust* (Brookings, 2014), *Digital Schools* (Brookings, 2012) y *The Next Wave: Using Digital Technology to Further Social and Political Innovation* (Brookings, 2011).

Tecnologías como los robots, la inteligencia artificial y el aprendizaje de las máquinas evolucionan a paso veloz. Estos avances pueden mejorar la rapidez, la calidad y los costes de bienes y servicios, pero también dejar sin empleo a un gran número de trabajadores. Dicha posibilidad pone en tela de juicio el modelo tradicional de prestaciones, según el cual la cobertura sanitaria y las pensiones están ligadas al empleo. En una economía que requiere muchos menos trabajadores, necesitamos pensar en cómo garantizar prestaciones a los desempleados. Si en el futuro la automatización va a restar seguridad laboral, tienen que existir prestaciones no ligadas al empleo. La «flexiguridad» o seguridad flexible es una de las vías posibles para garantizar el acceso a la sanidad, la educación y la vivienda a personas sin un empleo fijo. Además, las cuentas de producción por ramas de actividad pueden costear la formación continuada y el reciclaje profesional. Da igual cómo elijan los individuos emplear su tiempo, tienen que poder llevar vidas plenas aun cuando la sociedad precise menos trabajadores.

La lista de nuevas tecnologías crece cada día. Robots, realidad aumentada, algoritmos y las comunicaciones de máquina a máquina ayudan a las personas en una gran variedad de tareas.¹ Estas tecnologías son de amplio espectro y trascendentales por su potencial para transformar las empresas y las vidas humanas. Tienen la capacidad de facilitar la vida de los individuos y mejorar sus relaciones personales y laborales.² La tecnología se vuelve cada vez más avanzada y ello tiene una repercusión considerable en la población activa.³

En este capítulo examino el impacto de los robots, la inteligencia artificial y el aprendizaje automático en la población activa y las políticas públicas. Si la sociedad necesita menos trabajadores debido a la automatización y a la robótica, y muchas de las prestaciones sociales están ligadas a tener un empleo, ¿cómo va a percibir asistencia sanitaria y pensiones durante un periodo prolongado de tiempo la población no activa? Los programas políticos públicos deben afrontar cuestiones de gran trascendencia y hay que encontrar la manera de proporcionar prestaciones sociales en la nueva economía digital.





TECNOLOGÍAS EMERGENTES

Robots

El número de robots industriales ha aumentado en todo el mundo desarrollado. En 2013, por ejemplo, se calculaba que había alrededor de 1,2 millones de robots en uso. Esta cantidad ascendió hasta casi 1,5 millones en 2014 y se prevé que llegue a 1,9 millones en 2017.⁴ Japón tiene la cifra más alta, con 306.700, seguido de Norteamérica (237.400), China (182.300), Corea del Sur (175.600) y Alemania (175.200). En total, se espera que el sector de la robótica crezca de los 15.000 millones de dólares actuales hasta los 67.000 millones en 2025.⁵

Un estudio de RBC Global Asset Management muestra que se han reducido sustancialmente los costes en robótica y automatización. En el pasado, «los altos costes de la robótica industrial restringían su uso a unos pocos sectores de salarios altos, como el automovilístico. Sin embargo, en los últimos años, los costes medios de los robots se han abaratado y en muchas industrias estratégicas de Asia empiezan a converger el coste de los robots y los costes unitarios de una mano de obra con bajos salarios... Los robots representan hoy una alternativa viable al trabajador humano».⁶

En el mundo contemporáneo hay muchos robots que realizan funciones complejas. Según una presentación sobre robots, «a principios del siglo XXI asistimos a la primera oleada de robots sociables. Eran mascotas pequeñas y encantadoras, como AIBO, Pleo y Paro. A medida que la robótica ha avanzado, gracias en gran parte al teléfono inteligente, ha nacido una nueva generación de robots sociales, con los humanoides Pepper y Jimmy y el casi humano Jibo y Sophie, un *software* robótico de Geppetto Avatars. Un factor fundamental de las habilidades sociales de los robots es su capacidad para entender y responder correctamente al discurso humano y a sus contextos subyacentes y emocionales».⁷

Estas máquinas están habilitadas para ser creativas. El antropólogo Eitan Wilf, de la Universidad Hebrea de Jerusalén, nos dice que los robots sociables constituyen «un recurso cultural para negociar problemas de intencionalidad».⁸ Describe un «robot humanoide que improvisa *jazz* con su marimba», capaz de interpretar un contexto musical y responder creativamente a las improvisaciones de los otros músicos. Sus creadores pueden ponerlo en una banda de *jazz*, e improvisará con el resto de los músicos sin desentonar. Si alguien estuviera escuchando la música no podría distinguir el intérprete humano del robot.

Amazon ha organizado un «concurso de recogida de pedidos» para ver si los robots pueden «coger artículos de un estante y meterlos en un recipiente de manera autónoma». La compañía tiene alrededor de 50.000 personas trabajando en sus almacenes y quiere saber si los robots podrían desempeñar las tareas de seleccionar artículos y transportarlos a distintos puntos del almacén. Durante la competición, un robot de Berlín consiguió realizar satisfactoriamente diez de las doce actividades asignadas.

Para mover artículos en el almacén, la compañía ya utiliza 15.000 robots y se espera que adquiera más en el futuro.⁹

En el sector de la restauración, las empresas están empleando la tecnología para sustituir al personal humano en tareas de entrega. Así, algunos establecimientos usan *tablets* que permiten a los clientes hacer sus pedidos directamente a la cocina sin necesidad de un camarero. En otros pueden pagar directamente, eliminando la necesidad de personal de caja. Los hay que incluso indican al chef qué cantidad de un determinado ingrediente quieren en un plato, lo que ahorra costes.¹⁰

Otros investigadores están usando un robot llamado Nao para ayudar a las personas a combatir el estrés. En un proyecto piloto denominado «Stress Game» (juego de estrés), Thi-Hai-Ha Dang y Adriana Tapus proponen a los sujetos un juego de mesa en el que tienen que reunir todos los objetos que puedan. Durante la prueba, el estrés es alterado cambiando el grado de dificultad del juego y con ruidos cada vez que se comete un error. Los participantes están conectados a un monitor cardiaco para que Nao pueda ayudarlos a enfrentarse al estrés. Cuando el robot percibe un incremento en los niveles de estrés del humano, le da consejos destinados a disminuir la tensión. Dependiendo de la situación, puede responder de manera empática, alentadora o exigente. De esta manera, el «robot con personalidad» puede proporcionar respuestas dinámicas a los sujetos del experimento y ayudarlos a desenvolverse en situaciones de estrés.¹¹

Algoritmos informáticos

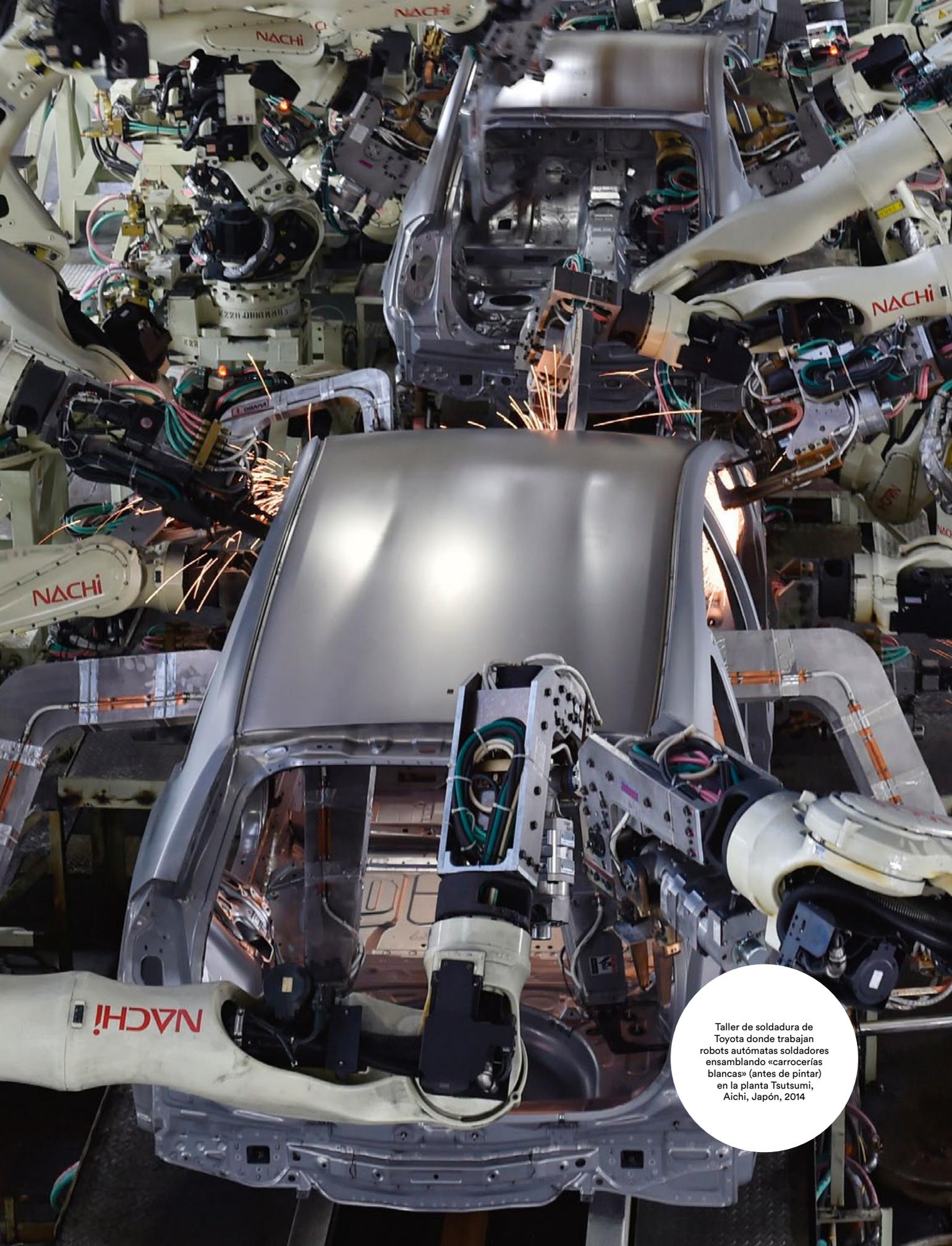
Algunos algoritmos informáticos ya han sustituido a las transacciones humanas. Lo vemos en los mercados de valores, donde la negociación de alta frecuencia a cargo de máquinas ha reemplazado a la toma de decisiones humana. Las personas envían órdenes de compra y venta, y los ordenadores las combinan en un abrir y cerrar de ojos, sin intervención humana. Las máquinas pueden detectar ineficiencias o elementos diferenciales en los mercados a muy pequeña escala y ejecutar operaciones rentables.¹²

Hay personas especializadas en operaciones de arbitraje, en las que los algoritmos observan que las mismas acciones tienen valores distintos en diferentes mercados. Los humanos no son muy eficaces a la hora de detectar diferenciales de precios, mientras que los ordenadores pueden hacer uso de complejas fórmulas matemáticas para determinar dónde hay oportunidades de negocio. Hay matemáticos muy brillantes en este tipo de análisis que han hecho posible ganar grandes cantidades de dinero.¹³

Inteligencia artificial

El término «inteligencia artificial» hace referencia a «máquinas que responden a la estimulación de un modo coherente con las respuestas tradicionales humanas, dada





Taller de soldadura de Toyota donde trabajan robots automáticos soldadores ensamblando «carrocerías blancas» (antes de pintar) en la planta Tsutsumi, Aichi, Japón, 2014



la capacidad humana para la contemplación, la consideración y el propósito».¹⁴ Incorpora el razonamiento y el juicio crítico a las respuestas. La inteligencia artificial, considerada en su día una fantasía futurista, es hoy una realidad y se ha incorporado a una gran diversidad de áreas. Se utiliza en finanzas, transportes, aviación y telecomunicaciones. Los sistemas expertos «toman decisiones que normalmente requieren niveles de pericia humanos».¹⁵ Estos sistemas ayudan a las personas a adelantarse a problemas o a hacer frente a las dificultades que puedan surgir.

La aplicación de la inteligencia artificial en numerosos sectores está en auge.¹⁶ Se está utilizando para sustituir a los humanos en muchos campos. Por ejemplo, se usa en la exploración espacial, la fabricación avanzada, el transporte, el desarrollo energético y la atención sanitaria. Al acceder a la extraordinaria potencia de procesamiento de los ordenadores, los individuos pueden complementar sus capacidades personales y mejorar la productividad.

IMPACTO SOBRE LA POBLACIÓN ACTIVA

El vertiginoso crecimiento de las nuevas tecnologías hace pensar que están teniendo un impacto sustancial en la población activa. Muchas de las grandes empresas tecnológicas han alcanzado economías de escala con una plantilla moderada. Por ejemplo, Derek Thompson afirma que «Google tiene un valor de 370.000 millones de dólares, pero solo cuenta con unos 55.000 empleados, menos de la décima parte de la plantilla de AT&T en su momento álgido [la década de 1960]».¹⁷ Según el economista Andrew McAfee, «el momento en que las máquinas pueden reemplazar al hombre en la mayoría de los empleos de la economía actual es ya una posibilidad, y no creo que suceda en un futuro demasiado lejano».¹⁸

En toda una serie de sectores, la tecnología está sustituyendo a la mano de obra, y esto tiene consecuencias drásticas en el empleo y la renta de las clases medias. Hod Lipson, ingeniero de la Universidad de Cornell, argumenta que «durante mucho tiempo la creencia común era que la tecnología destruía empleos, pero también creaba otros nuevos y mejores. Ahora los indicios dicen que la tecnología está destruyendo empleos y creando en efecto otros nuevos y mejores, pero en mucha menor cantidad».¹⁹

Martin Ford nos hace una advertencia igualmente inquietante. En su libro *The Lights in the Tunnel* (Las luces del túnel), sostiene que «a medida que la tecnología se acelera, la automatización podría acabar penetrando en la economía en tal medida que los salarios no proporcionarían al grueso de los consumidores unos ingresos lo bastante holgados ni confianza en el futuro. Si este problema no se ataja, el resultado será una espiral económica descendente».²⁰ A continuación nos avisa de que «en algún momento futuro, que puede tardar en llegar años o décadas, las máquinas podrán realizar el trabajo de un gran porcentaje de la mayoría de las personas “corrientes”, que ya no encontrarán nuevos empleos».

Las empresas han descubierto que la robótica, el aprendizaje automático y la inteligencia artificial pueden sustituir a los humanos y superarlos en precisión, productividad y eficiencia. Durante la gran recesión de 2008-2009, muchas empresas se vieron obligadas a reducir sus plantillas por motivos presupuestarios. Tuvieron que buscar el modo de mantener los negocios con menos personal. Un empresario que conozco tenía 500 empleados para su negocio de 100 millones de dólares y ahora tiene la misma cantidad,



aunque los ingresos de la compañía han crecido hasta los 250 millones. Lo consiguió gracias a la automatización de determinadas funciones y usando robots y avanzadas tecnologías de fabricación.

La Oficina Estadounidense de Estadísticas Laborales (BLS, por sus siglas en inglés) recopila proyecciones de empleo futuro. En su análisis más reciente, la agencia prevé que entre 2012 y 2022 se generarán 15,6 millones de nuevos empleos. Eso significa un crecimiento de la población activa de alrededor del 0,5% anual.

Se espera que los sectores de la asistencia sanitaria y social sean los que más crezcan, con una tasa anual del 2,6%. Esto supondrá unos cinco millones de nuevos puestos de trabajo a lo largo de la década. Es decir, más o menos una tercera parte de la creación de empleo prevista.²¹ Otras áreas que podrían experimentar un incremento en el empleo son los servicios profesionales (3,5 millones), la construcción (1,6 millones), el ocio y la hostelería (1,3 millones), la Administración central y local (929.000), las finanzas (751.000) y la educación (675.000).

Teniendo en cuenta los avances tecnológicos, es interesante observar que uno de los campos donde se augura una reducción en el número de empleos es el sector de la informática. Las proyecciones de la BLS avanzan que el sector perderá unos 65.000 puestos de trabajo en los próximos diez años. Aunque la tecnología está revolucionando muchas empresas, lo hace transformando su manera de operar y no incrementando el número de puestos de trabajo. La tecnología puede estimular la productividad y mejorar la eficiencia, pero lo consigue reduciendo el número de empleados necesarios para generar niveles de producción iguales o mayores.

También en el sector de la industria se vaticina pérdida de empleo. La BLS calcula que en Estados Unidos desaparecerán 50.000 puestos de trabajo, mientras que la administración federal se reducirá en 407.000 puestos, y en agricultura, bosques, pesca y caza desaparecerán 223.000 empleos.²² Se cree que estos sectores serán los que menos empleo generarán en la próxima década.

Como las proyecciones de la BLS dan pocas cosas por hecho en lo referido a las tecnologías emergentes, es muy probable que sus cálculos hayan subestimado el efecto perturbador que traen consigo. Resulta difícil cuantificar los efectos que tendrán los robots, la inteligencia artificial y los sensores sobre la población activa, porque estamos aún en las primeras fases de la revolución tecnológica. Es difícil ser categórico respecto a las tendencias emergentes porque no está claro cómo afectarán las nuevas tecnologías al mercado laboral.

Pero hay predicciones en muchos sectores sobre el posible impacto de la informatización. Carl Frey y Michael Osborne, investigadores de la Universidad de Oxford, afirman que la tecnología transformará

muchos ámbitos de la vida. Han estudiado 702 sectores profesionales y han descubierto que «el 47% de los trabajadores estadounidenses tiene grandes probabilidades de ver automatizados sus empleos durante los próximos veinte años».²³

De acuerdo con su análisis, empleados de telemarketing, del sector inmobiliario, costureros, técnicos matemáticos, agentes de seguros, relojeros, agentes de carga, asesores fiscales, técnicos de laboratorios fotográficos, gestores de clientes bancarios, bibliotecarios y mantenedores de bases de datos tienen el 99% de probabilidades de que se informaticen sus puestos de trabajo. En el otro extremo del espectro, terapeutas ocupacionales, mecánicos, directores de servicios de emergencias, trabajadores sociales sanitarios, estomatólogos, terapeutas ocupacionales, trabajadores sociales sanitarios, cirujanos orales, supervisores de brigadas antiincendios y nutricionistas tienen menos del 1% de probabilidades de que se informaticen sus empleos. Estos análisis se basan en los niveles de informatización, salariales y en la formación requerida en los diferentes sectores profesionales.²⁴

Aparte de esto, sabemos que algunos campos, como la atención sanitaria y la educación, han tardado más en incorporarse a la revolución tecnológica, pero ya empiezan a adoptar nuevos modelos. Las innovaciones en aprendizaje personalizado y salud móvil implican que muchas escuelas y muchos hospitales estén haciendo la transición desde el servicio tradicional a uno informatizado. Los profesores utilizan cursos en línea, masivos y abiertos (MOOC, por sus siglas en inglés) e instrucciones a través de *tablets*, mientras que la sanidad ya cuenta con sensores médicos, historias electrónicas y aprendizaje automático para diagnóstico y evaluación de tratamientos.

En los hospitales, la plantilla solía encargarse personalmente del grueso de los tratamientos médicos. Pero los profesionales sanitarios ahora almacenan la información en historias electrónicas y a través de redes compartidas combinan pruebas de laboratorio, datos clínicos e información administrativa para conseguir una mayor eficiencia. Los pacientes navegan por la red para obtener información médica y consejo profesional complementario gracias a los recursos en línea. Los sectores de la educación y la sanidad están experimentando las alteraciones que antes transformaron otras áreas.

Dadas las incertidumbres que plantean las proyecciones de empleo, no es sorprendente que los expertos no se pongan de acuerdo acerca del impacto de las tecnologías emergentes. Por ejemplo, en su muy elogiada obra *La carrera contra la máquina. Cómo la revolución*



digital está acelerando la innovación, aumentando la productividad y transformando irreversiblemente el empleo y la economía, los economistas Erik Brynjolfsson y Andrew McAfee plantean que la tecnología está produciendo importantes cambios en la población activa. Según ellos, «el progreso tecnológico va a dejar atrás a muchas personas, a muchísimas incluso, a medida que prosigue su avance. Demostraremos que no ha habido un momento mejor para un trabajador con conocimientos especializados o la formación adecuada, porque puede usar las tecnologías para crear y capturar valor. Sin embargo, no lo ha habido peor para un trabajador que solo puede ofrecer conocimientos y habilidades “normales”, porque los ordenadores, los robots y otras tecnologías digitales están adquiriendo esos conocimientos y destrezas a una velocidad extraordinaria».²⁵

Lawrence Summers, exsecretario del Tesoro de Estados Unidos, es igual de pesimista. Sostiene que «si se mantiene la tendencia actual, muy bien podría suceder que, en una generación, la cuarta parte de los hombres de mediana edad se queden sin trabajo en algún momento». Desde esta perspectiva, el mayor reto económico mundial será «generar suficientes puestos de trabajo».²⁶

No obstante, hay economistas que rebaten estas afirmaciones. Reconocen que muchos empleos van a desaparecer por el avance tecnológico, pero afirman que se crearán otros nuevos. Habrá menos puestos de empleados de almacén porque las máquinas podrán hacerlo mejor que los humanos. Pero se generarán puestos de analistas de *big data*, de minería de datos y de gestores de redes de datos compartidos. Según estos expertos, la destrucción y creación de empleo acabarán equilibrándose en el largo plazo. En las décadas futuras, el trabajo se habrá transformado, pero los humanos seguirán siendo necesarios para gestionar el mundo digital.

Por ejemplo, el economista David Autor, del MIT, ha analizado datos sobre empleos y tecnologías y «duda de que la tecnología pueda provocar un cambio tan abrupto en la cifra total de empleo... La repentina desaceleración en la creación de empleos es un gran misterio, pero no hay suficientes pruebas de que esté vinculada a los ordenadores».²⁷ En la misma línea, el economista Richard Freeman, de Harvard, se muestra «escéptico respecto a que la tecnología vaya a transformar numerosos y variados sectores empresariales de una forma tan rápida que explique las recientes cifras de empleo».²⁸

Robert Gordon, economista de la Universidad Northwestern, va aún más allá y manifiesta que «los recientes avances en informática y automatización son menos transformadores de lo que lo fueron la electrificación, los automóviles y las comunicaciones inalámbricas, y tal vez incluso menos que el agua corriente. Los avances pasados que permitieron a los individuos comunicarse y recorrer rápidamente largas distancias pueden en última instancia resultar más importantes para el progreso de la sociedad que cualquier cosa que suceda en el siglo XXI».²⁹ A partir de este razonamiento, no prevé efectos drásticos de las tecnologías emergentes en la población activa, aunque muchos otros expertos ya adelanten la sustitución de la mano de obra por la tecnología.

Un estudio del Pew Research Center entrevistó a 1.896 expertos sobre el impacto de las tecnologías emergentes. Los responsables del estudio concluyeron que «la mitad de estos expertos (48%) pronostican un futuro en el que robots y agentes digitales habrán reemplazado a numerosos trabajadores industriales y administrativos, y muchos de ellos expresan con preocupación que esto conducirá a un enorme incremento de la desigualdad en los ingresos, con masas sin opción a un puesto de trabajo y un desplome del orden social».³⁰



«La utopía está en el horizonte.
Camino dos pasos, ella se aleja
dos pasos y el horizonte se corre
diez pasos más allá. Entonces,
¿para que sirve la utopía? Para
eso, sirve para caminar.»

EDUARDO GALEANO (1940-2015)
Escritor uruguayo

Christo

The Floating Piers (2014-2016)

Lago Iseo, Italia. Con este proyecto, inaugurado en junio de 2016, el artista búlgaro Christo hace realidad su sueño de poder caminar sobre el agua. Se trata de una plataforma de 3 km de longitud que une dos pueblos sobre el lago Iseo, Sulzano y Monte Isola, y la pequeña isla de San Paolo





CONSECUENCIAS PARA LA POLÍTICA PÚBLICA

En el clásico de Edward Bellamy, *Mirando atrás*, el protagonista Julian West se despierta de un sueño de 113 años y descubre que Estados Unidos en 2000 es completamente diferente de cómo era en 1887. La gente deja de trabajar a los cuarenta y cinco años y se dedica a asesorar a otras personas y a contribuir al propósito general de comunidad.³¹ La semana laboral es más corta para el ciudadano común y todo el mundo tiene acceso a la sanidad, la educación y la vivienda.

De forma similar a nuestra época, las nuevas tecnologías permiten que las personas sean muy productivas durante muy poco tiempo. La sociedad no necesita gran cantidad de trabajadores, por lo que las personas pueden dedicar gran parte de su vida a la educación, el voluntariado y el desarrollo comunitario. En conjunción con estas tendencias de empleo, las políticas administrativas han cambiado para fomentar nuevos estilos y modos de vida.

Si volvemos al momento actual, veremos que es posible que estemos en vísperas de una transición tecnológica similar. La robótica y el aprendizaje automático han mejorado la productividad y reforzado las economías de las naciones desarrolladas. Los países que han invertido en innovación han experimentado un enorme auge de su rendimiento económico. En el futuro es posible que la sociedad no necesite tantos trabajadores como hoy en día.

Sin embargo, a diferencia de la utopía de Bellamy, ha habido escaso debate público sobre las repercusiones económicas o políticas de las tecnologías emergentes. Los analistas temen que las sociedades del conocimiento estén destruyendo empleos en la industria y exacerbando las disensiones sociales y económicas. En sus propuestas más pesimistas, los escépticos temen que la tecnología elimine empleos, reduzca las rentas y dé lugar a una clase marginal de ciudadanos permanentemente desempleados. Como sostienen Nicolas Colin y Bruno Palier, «el empleo se está convirtiendo en algo menos habitual, menos estable y por lo general peor remunerado. Por tanto, los programas sociales tendrán que cubrir las necesidades no solo de los que están fuera del mercado laboral, sino también de muchos de los que están dentro».³²

Si la innovación tecnológica permite que las empresas suministren bienes y servicios con una plantilla mucho menor, ¿qué significará esto para los trabajadores? Un incremento notable en el número de personas sin un empleo a tiempo completo agudizaría las diferencias dentro de la sociedad y complicaría la distribución de prestaciones tales como pensiones, asistencia sanitaria y seguros. La mayor parte de las prestaciones están ligadas al empleo, por lo que si la economía precisa menos trabajadores debido al progreso tecnológico, es necesario pensar en cómo va a afectar esto al reparto de prestaciones sociales.

En esta sección analizo las medidas que debemos tener en cuenta a corto y largo plazo para enfrentarnos a las tecnologías

emergentes. Esto incluye pensar en la manera de distribuir prestaciones no ligadas al empleo, contemplar una renta básica garantizada, redefinir el crédito fiscal por ingresos derivados de la actividad laboral, proporcionar cuentas de producción de las ramas de actividad para la formación continuada y el reciclaje laboral, fomentar el reparto de beneficios por parte de las empresas, proporcionar prestaciones por voluntariado, reformar los planes de estudios para asegurarnos que los universitarios adquieren los conocimientos necesarios para una economía del siglo XXI, impulsar la educación de adultos y la formación continuada, ampliar la oferta artística y cultural para el tiempo de ocio e impedir la aparición de una clase permanentemente marginada que sufra los efectos indeseables de la desigualdad de renta.

Prestaciones no ligadas al empleo

Si llegamos a una situación en la que muchas personas estén desempleadas o subempleadas durante prolongados periodos de tiempo, tendremos que encontrar la manera de proporcionarles asistencia sanitaria, ayudas de invalidez y pensiones. Esta idea, llamada «flexiguridad» o seguridad flexible, «anula la relación directa entre prestaciones y empleo».³³ Garantiza asistencia sanitaria, educación y ayudas para la vivienda sobre una base universal.

Actualmente, una persona debe trabajar el 60% de su tiempo (unas 24 horas a la semana) para acceder a prestaciones completas. Un empleado a tiempo completo puede optar a los planes de asistencia sanitaria y de pensiones que patrocina su empresa. Desde el final de la Segunda Guerra Mundial, el mercado laboral ha constituido el sistema principal de distribución de prestaciones sociales. Excepto para los pobres y ancianos, esto mantiene las prestaciones ajenas al sector público y hace recaer toda la responsabilidad en la empresa privada.

Ese método funcionó bien en una época en la que la mayoría de las personas que buscaba trabajo lo encontraba. Individuos de formación limitada podían encontrar empleos bien pagados con prestaciones sociales en fábricas, almacenes y centros de producción. Podían dar una educación a sus hijos, alcanzar un nivel de vida razonablemente confortable y estar protegidos frente a la enfermedad o la invalidez.

Las complicaciones llegaron cuando la economía cambió de rumbo, los sueldos se estancaron y la tecnología hizo posible que las compañías funcionaran con menos trabajadores. La aparición de la robótica, el aprendizaje automático, la inteligencia artificial y comunicaciones de máquina a máquina eliminó gran cantidad de empleos y situó a muchas personas fuera del sector de la población activa.

En sanidad, los ciudadanos deben recurrir a planes no ligados a su empleo para acceder a servicios de calidad. Es posible, a través de aseguradoras privadas, por ejemplo, contratar seguros médicos contra riesgos de catástrofes. O si la persona es pobre o anciana, hay





programas gubernamentales que le garantizan la atención médica. La reciente ampliación de los seguros médicos en Estados Unidos gracias a la Affordable Care Act (Ley de Atención Sanitaria Asequible) ha brindado cobertura a millones de personas que anteriormente no la tenían.

En cuanto a los planes de pensiones, muchos empresarios se han pasado a los planes tipo 401. Los empleados hacen sus propias contribuciones y a veces reciben una aportación equivalente por parte de la empresa. Pero esto no sirve para los que están fuera de la población activa y necesitan una pensión de jubilación. Incluso la Seguridad Social está vinculada al empleo. Los que no hayan trabajado no podrán optar a prestaciones por jubilación, así que tenemos que buscar el modo de protegerlas en la nueva economía.

Cuentas de producción de las ramas de actividad para la formación continuada y el reciclaje laboral

Deberíamos sopesar la creación de cuentas de actividad destinadas al aprendizaje permanente y al reciclaje laboral. En una época de rápida innovación tecnológica y pérdida de empleo, tiene que haber una manera de que las personas adquieran nuevos conocimientos en su edad adulta. Cuando los individuos trabajan por cuenta ajena, sus empresas podrían proporcionar una cantidad determinada a un fondo personal. Esta cantidad podría ir aumentando con las aportaciones del interesado y de la administración pública. De modo similar a un plan de jubilación, el dinero de este fondo se podría invertir libre de impuestos en diferentes opciones, como reservas de efectivo, acciones y bonos. El titular de la cuenta podría hacer uso de él para costear su formación continuada y su reciclaje laboral. Sería portátil, es decir que, si el titular se mudara o cambiara de empleo, la cuenta se desplazaría con él.

El objeto de esta cuenta es ofrecer incentivos para la formación continua. En prácticamente cualquier contexto, los individuos van a tener que continuar su formación más allá de sus primeros años de vida. Los nuevos puestos de trabajo van a exigir cualificaciones diferentes de las adquiridas en la escuela. Se crearán nuevos empleos que tal vez aún no existen. Como señalaba Kemal Dervis, investigador de la Brookings Institution, a medida que avance la innovación tecnológica en el futuro será esencial facilitar a las personas los medios de mejorar sus cualificaciones y su nivel de conocimientos.³⁴ Nos recuerda que Francia ha creado «cuentas de actividad individuales» asociadas a prestaciones sociales.

Con el incremento del tiempo libre que se espera, los adultos necesitarán tiempo y ayuda económica para su formación continuada. No debemos ver la educación meramente como una etapa en la que los jóvenes adquieren nuevos conocimientos o profundizan en áreas de interés. Por el contrario, hemos de pensar en la formación como una actividad continua que amplía el horizonte de las personas a lo largo de toda su vida. La educación es una actividad enriquecedora y tenemos que concebirla como un beneficio general para los individuos y para la sociedad en su conjunto.

Incentivos para el voluntariado

Las tendencias mencionadas en este análisis apuntan a que necesitamos contemplar ingresos complementarios o la posibilidad de optar a prestaciones a través de vehículos que no sean el empleo a tiempo completo. Las repercusiones de las tecnologías emergentes en la población activa significan que, en el futuro, muchas personas no podrán mantener a sus familias con un sueldo fijo.

Una alternativa sería el voluntariado. Incluso cuando las personas tienen opciones de empleo limitadas, muchas participan en una gran variedad de organizaciones solidarias. Ayudan a



otras, dan formación a la siguiente generación o proporcionan asistencia a los menos favorecidos de la sociedad.

Los resultados de diversos estudios nos demuestran que los jóvenes tienen un interés especial por el voluntariado. En general, presentan diferentes actitudes respecto al trabajo y el ocio, y muchos afirman necesitar tiempo para dedicarse a actividades distintas. Por ejemplo, un estudio sobre universitarios estadounidenses reveló que buscan «un trabajo orientado a ayudar a los demás y a mejorar la sociedad». Además, valoran la calidad de vida, no solo el bienestar económico.³⁵

Gran cantidad de ellos valora las actividades de voluntariado que no estén relacionadas con su trabajo. Tienen intereses muy variados y quieren desarrollar actividades extracurriculares que les llenen como personas. Pueden ser clases extraescolares, enseñanza del inglés como lengua extranjera, combatir la violencia doméstica, proteger el medioambiente o fomentar iniciativas de emprendedores. Según un estudio de Deloitte, «el 63% de los “milenaristas” son socios de organizaciones benéficas y el 43% son voluntarios activos o miembros de una organización comunitaria».³⁶

En un mundo digital en el que habrá menos tiempo de trabajo y más de ocio, tiene sentido pensar en crear incentivos y créditos laborales para el voluntariado. Podría tratarse de créditos destinados a prestaciones sociales o recompensas públicas que premien las aportaciones a la comunidad. En el Reino Unido, por ejemplo, a los voluntarios se les reembolsa sus gastos o se les da créditos para programas de formación laboral si participan en causas altruistas. Además, el voluntariado se considera una «búsqueda activa de empleo», de modo que permite optar a créditos de la Administración.³⁷

Con vistas al futuro, en Estados Unidos debe tenerse en cuenta ese tipo de estímulos. Es probable que entonces la gente pase más tiempo fuera del trabajo y por eso tiene sentido fomentar su compromiso con la comunidad y ofrecer incentivos para el voluntariado en organizaciones sin ánimo de lucro y causas caritativas. Esto beneficiará a la comunidad en su conjunto y brindará a los ciudadanos la posibilidad de participar en actividades de utilidad.

Ampliar la oferta artística y cultural para el tiempo libre

El llamado «fin del trabajo» puede crear un nuevo tipo de economía. Según el economista Lawrence Katz, de Harvard, «es posible que la informática y los robots eliminen empleos tradicionales y posibiliten una nueva economía artesanal... Una economía que gire alrededor de la expresión personal, en la que los individuos dediquen su tiempo a actividades artísticas».³⁸ Tal y como él lo ve, esta transición transformaría un mundo de consumo en un mundo de creatividad.

Las personas dedicarán su tiempo libre a cultivar el arte y la cultura, o a intereses específicos, como lectura, poesía, música o carpintería... Dependiendo de las circunstancias, también dispondrán de más tiempo para la familia y los amigos. Un estudio del tiempo que pasamos en familia ha concluido que las condiciones macroeconómicas determinan cuánto tiempo pasamos con otras personas. Cuando aumentan los problemas de empleo, «los padres dedican más tiempo a actividades enriquecedoras de cuidado de sus hijos» y «es poco probable que las madres trabajen a jornada completa».³⁹ En la medida en que existan oportunidades para que las personas cultiven intereses más amplios, la reducción del empleo no tiene por qué eliminar oportunidades para la actividad cultural.

**Millennials*: nacidos en la década de 1980 (N. del T.).



CONCLUSIÓN

En suma, las sociedades avanzadas se encuentran en un importante punto de inflexión en cuanto a los conceptos de trabajo, ocio y prestaciones sociales. Si estas economías necesitan menos trabajadores para realizar las tareas y las prestaciones se perciben fundamentalmente cuando se posee un empleo a tiempo completo, existe el riesgo de que muchas personas tengan dificultades para recibir atención sanitaria, pensiones y para conservar el nivel de renta que necesitan para vivir. La preocupación se agrava en un momento como el actual, de grandes desigualdades de ingresos e importantes recortes en la redistribución económica.⁴⁰

El contraste entre la época de escasez que hemos vivido y la abundancia que se prevé para los años venideros de la mano de las nuevas tecnologías implica que debemos prestar atención al contrato social. Tenemos que reescribirlo a la vista de los impresionantes cambios que se están produciendo en materia de empleo y tiempo libre. Las personas deben comprender que nos encontramos en una interrupción fundamental en el ciclo actual, en el cual las personas reciben un salario por su trabajo y gastan su dinero en bienes y servicios. Cuando una porción considerable de la mano de obra ya no sea necesaria para que la economía funcione, tendremos que repensar la generación de ingresos, el empleo y las políticas públicas. El nuevo sistema económico no precisará todos los trabajadores que existen en la actualidad. Las nuevas tecnologías dejarán a estas personas obsoletas y sin posibilidad de encontrar empleo.

En esta situación, es importante abordar las cuestiones relativas a legislación y tiempo libre suscitadas por un desempleo o subempleo persistentes. Existe peligro de disturbios y agitación social entre el porcentaje cada vez mayor de población desempleada. Eso crea pobreza e insatisfacción social, y el riesgo de inestabilidad amenaza a la sociedad en su conjunto. La estabilidad no puede forzarse con presencia policial o con la reclusión de los ricos en comunidades fortificadas.

Tiene que haber alguna manera para que las personas lleven vidas plenas aun cuando la sociedad requiera bastantes menos trabajadores. Debemos reflexionar sobre cómo hacer frente a estos problemas antes de que aparezca una clase marginal permanente de individuos subempleados. Esto exige tomar una serie de medidas. Tienen que abrirse vías para la formación continuada, oportunidades para las artes y la cultura y mecanismos para complementar la renta y las prestaciones que no estén vinculados a tener un empleo a tiempo completo. Las medidas que favorezcan el voluntariado y recompensen a aquellos que contribuyan a causas altruistas tienen sentido desde el punto de vista de la sociedad en su conjunto. La adopción de dichas medidas nos ayudará a adaptarnos a las nuevas realidades económicas.

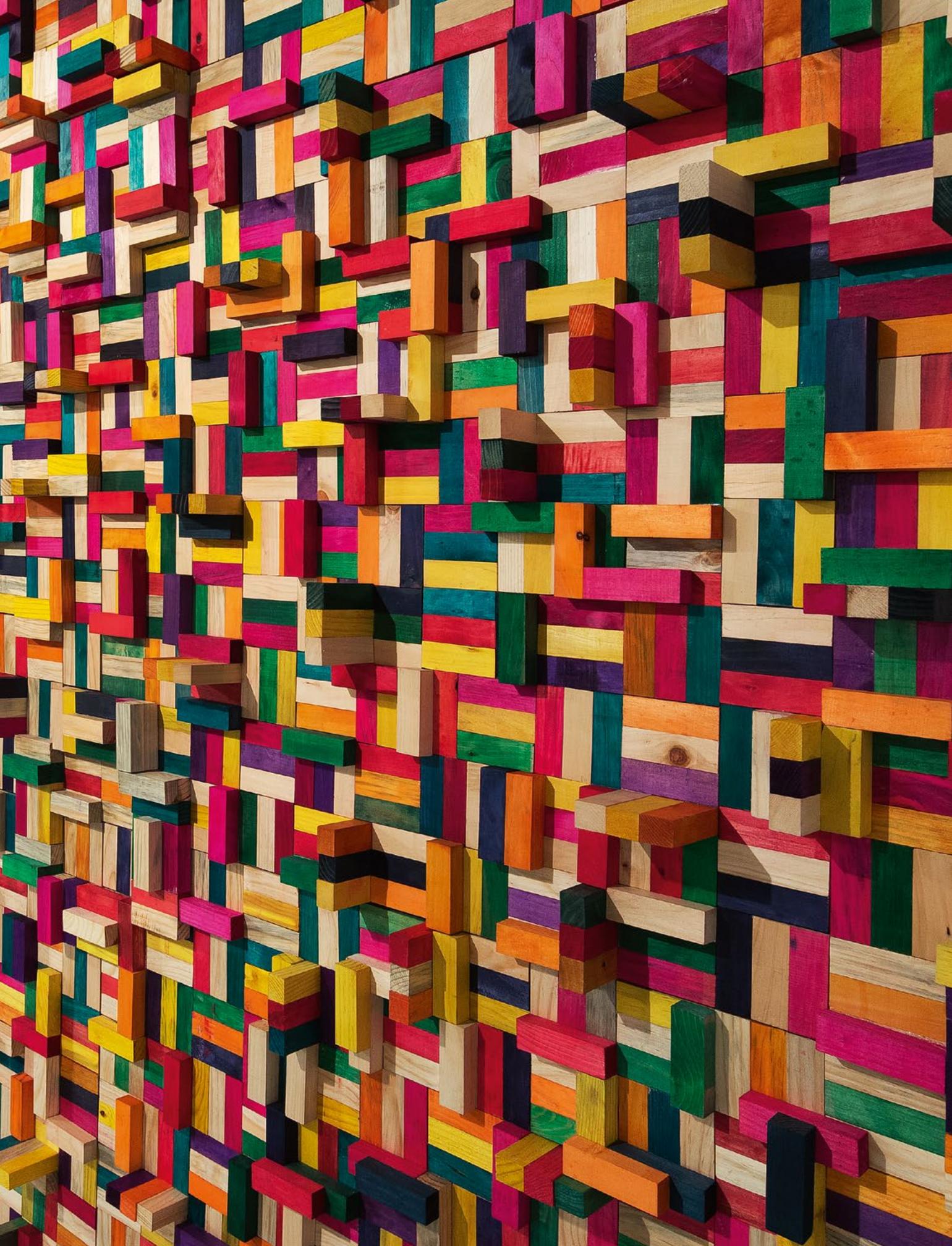
AGRADECIMIENTOS

Quisiera dar las gracias a Hillary Schaub por su excelente trabajo como investigadora ayudante en este proyecto.



NOTAS

1. Manyika, J., Chui, M., Bughin, J., Dobbs, R., Bisson, P. y Marrs, A., «Disruptive Technologies: Advances That Will Transform Life, Business, and the Global Economy», McKinsey Global Institute, mayo de 2013.
2. Daniela, R., «How Technological Breakthroughs Will Transform Everyday Life», en *Foreign Affairs*, julio/agosto de 2015.
3. Para una reflexión más amplia sobre estas cuestiones, véase West, D. M., *What Happens If Robots Take the Jobs?*, Brookings Institution Policy Report, octubre de 2015.
4. Hagerty, J., «Meet the New Generation of Robots for Manufacturing», en *Wall Street Journal*, 2 de junio de 2015.
5. Sander, A. y Wolfgang, M., «The Rise of Robotics», The Boston Consulting Group, 27 de agosto de 2014. https://www.bcgperspectives.com/content/articles/business_unit_strategy_innovation_rise_of_robotics/
6. RBC Global Asset Management, *Global Megatrends: Automation in Emerging Markets*, 2014.
7. Breazeal, C., «The Personal Side of Robots», South by Southwest, 13 de marzo de 2015.
8. Wilf, E., «Sociable Robots, Jazz Music, and Divination: Contingency as a Cultural Resource for Negotiating Problems of Intentionality», en *American Ethnologist: Journal of the American Ethnological Society*, 6 de noviembre de 2013, p. 605. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/amet.12041/abstract>
9. Murphy, M., «Amazon Tests Out Robots That Might One Day Replace Warehouse Workers», en *Quartz*, 1 de junio de 2015.
10. DePillis, L., «Minimum-Wage Offensive Could Speed Arrival of Robot-Powered Restaurants», en *The Washington Post*, 16 de agosto de 2015.
11. Dang, T. y Tapus, A., «Stress Game: The Role of Motivational Robotic Assistance in Reducing User's Task Stress», en *International Journal of Social Robotics*, abril de 2015.
12. Lewis, M., *Flash Boys: A Wall Street Revolt*, Nueva York, W. W. Norton, 2015.
13. Kirilenko, A. A. y Lo, A. W., «Moore's Law versus Murphy's Law: Algorithmic Trading and Its Discontents», en *Journal of Economic Perspectives*, 2013. <http://www.jstor.org/stable/pdf/23391690.pdf?acceptTC=true>
14. Shubhendu, S. y Vijay, J., «Applicability of Artificial Intelligence in Different Fields of Life», en *International Journal of Scientific Engineering and Research*, septiembre de 2013.
15. *Ibid.*
16. *Ibid.*
17. Thompson, D., «A World Without Work», en *The Atlantic*, julio/agosto de 2015.
18. Nakagawa, D., «The Second Machine Age is Approaching», en *The Huffington Post*, 24 de febrero de 2015.
19. *MIT Technology Review*, «Who Will Own the Robots», septiembre de 2015.
20. Ford, M., *The Lights in the Tunnel: Automation, Accelerating Technology, and the Economy of the Future*, 2009. Véase también su obra más reciente, *Rise of the Robots: Technology and the Threat of a Jobless Future*, Nueva York, Basic Books, 2015.
21. U. S. Bureau of Labor Statistics, «Employment Projections: 2012-2022 Summary», 19 de diciembre de 2013. <http://www.bls.gov/news.release/ecopro.nr0.htm>
22. *Ibid.*
23. Citado en Meyerson, H., «Technology and Trade Policy is Pointing America Toward a Job Apocalypse», en *The Washington Post*, 26 de marzo de 2014. El artículo original es de Frey, C. B. y Osborne, M., «The Future of Employment: How Susceptible Are Jobs to Computerisation», Oxford University Programme on the Impacts of Future Technology, 17 de septiembre de 2013.
24. Frey y Osborne, «The Future of Employment», *op. cit.*, pp. 57-72.
25. Brynjolfsson, E. y McAfee, A., *The Second Machine Age: Work, Progress, and Prosperity in a Time of Brilliant Technologies*, Nueva York, W. W. Norton, 2014, p. 11.
26. Summers, L., «The Economic Challenge of the Future: Jobs», en *Wall Street Journal*, 7 de julio de 2014.
27. Citado en Rotman, D., «How Technology Is Destroying Jobs», en *MIT Technology Review*, 12 de junio de 2013. <http://www.technologyreview.com/featuredstory/515926/howtechnology-is-destroying-jobs/>
28. *Ibid.*
29. Citado en Kearney, M., Hershbein B. y Boddy, D., «The Future of Work in the Age of the Machine», Brookings Institution Hamilton Project, febrero de 2015.
30. Smith, A. y Anderson, J., «AI, Robotics, and the Future of Jobs», Pew Research Center, 6 de agosto de 2014.
31. Bellamy, E., *Looking Backward 2000-1887*, Boston, Ticknor & Co., 1888.
32. Colin, N. y Palier, B., «Social Policy for a Digital Age», en *Foreign Affairs*, julio/agosto de 2015.
33. *Ibid.*
34. Dervis, K., «A New Birth for Social Democracy», en *Brookings Institution Project Syndicate*, 10 de junio de 2015.
35. The Griffith Insurance Education Foundation, «Millennial Generation Attitudes About Work and the Insurance Industry», 6 de febrero de 2012.
36. Pollack, L., «Attitudes and Attributes of Millennials in the Workplace», 12 de septiembre de 2014.
37. Job Centre Plus, «Volunteering While Getting Benefits», Ministerio de Trabajo y Pensiones del Reino Unido, octubre de 2010. https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/264508/dwp1023.pdf
38. Citado en Thompson, D., «A World Without Work», *op. cit.*
39. Morill, M. S. y Pabilonia, S. W., «What Effects Do Macroeconomic Conditions Have on Families' Time Together?», Leibniz Information Centre for Economics, 2012. <http://hdl.handle.net/10419/58561>
40. West, D. M., *Billionaires: Reflections on the Upper Crust*, Washington D. C., Brookings Institution Press, 2014.



El próximo paso en finanzas: la banca exponencial

FRANCISCO GONZÁLEZ

Imagen de apertura:
Eduardo Terrazas
14.23. Serie «Museo de lo cotidiano» (2014)
Bloques de madera entintados con anilina
sobre bastidor de madera
Colección de Proyectos Monclova
Ciudad de México, México



Francisco González
Presidente de BBVA

Licenciado en Ciencias Económicas y Empresariales, Francisco González es presidente de BBVA desde el año 2000. Es miembro del Consejo de Administración del Institute of International Finance (IIF) y de diversos foros internacionales, entre otros, el Global Advisory Council of The Conference Board, de cuyo Board of Trustees es vicepresidente. Representa a BBVA en la International Monetary Conference (IMC) y preside la Fundación BBVA. Previamente a la fusión del Banco Bilbao Vizcaya y Argentaria, presidió Argentaria entre 1996 y 1999, donde lideró la integración, transformación y privatización de un grupo muy diverso de bancos públicos. Inició su carrera profesional en 1964 como programador en una empresa informática, época de la que viene su clara apuesta por transformar la banca del siglo XXI con el apoyo de las nuevas tecnologías.

Las tecnologías exponenciales traen consigo enormes oportunidades para construir un sistema financiero mucho más eficiente y productivo, capaz de impulsar eficazmente el crecimiento y el bienestar globales. Esto exige una profunda transformación de la industria financiera y amenaza la supervivencia de los actuales bancos. En este artículo se plantea cómo el avance tecnológico afecta a la economía y a las empresas como paso previo a abordar su impacto en la industria financiera. A continuación se exponen los rasgos fundamentales de la transformación que deben emprender las entidades financieras. Este último análisis se apoya en buena medida en la experiencia de BBVA, que lleva ya casi una década en un proyecto radical de transformación.

INTRODUCCIÓN: ¿HACIA UNA BANCA SIN BANCOS?

Casi una década después del desencadenamiento de la crisis financiera en 2007 y después de unos masivos —y muy costosos— saneamientos y recapitalizaciones, en gran medida a costa del sector público, es decir, de los contribuyentes, la industria bancaria global vive un momento aún más difícil, ya que si en la década anterior estaba en juego la continuidad de gran parte de los bancos existentes, ahora lo que está en riesgo es la propia supervivencia de la banca tal y como la hemos conocido durante siglos.

Si examinamos la abundantísima literatura sobre la situación actual y las perspectivas de la banca, con frecuencia se atribuye la baja y decreciente rentabilidad del sector y sus inciertas perspectivas de futuro a los efectos más o menos retrasados de la crisis: el mantenimiento, en muchas entidades de muchos países, de activos improductivos y morosos, valorados en balance a precios superiores a los de mercado; el bajo crecimiento económico y, por tanto, del negocio; el mayor rigor regulatorio, que ha multiplicado las exigencias de capital y liquidez y ha reducido los ingresos en muchas actividades; y, sobre todo, los tipos de interés negativos en los países desarrollados, con un fuerte impacto negativo en la rentabilidad de las operaciones bancarias. Estos niveles de tipos sin precedentes son, a su vez, reflejo de políticas monetarias fuertemente expansivas, dirigidas inicialmente a evitar una crisis bancaria masiva y a mitigar la recesión global y, después, a estimular una recuperación que a día de hoy sigue siendo vacilante. También se cita la grave merma en la reputación de los bancos, a raíz de las malas prácticas que se encuentran en el origen de la crisis, y que contribuiría a una menor inclinación de amplios sectores sociales, especialmente de los más jóvenes, a recurrir a los servicios de los bancos y a su aceptación de otras alternativas para satisfacer sus necesidades financieras (BCE 2015; FMI 2015).





Sin embargo, a un nivel más profundo y fundamental, los mayores riesgos para el futuro de los bancos se centran en el impacto de la revolución tecnológica y en los cambios de largo alcance que está impulsando en la economía y la sociedad globales. Y no solo en un sentido macro, sino muy especialmente en los cambios en la vida de las personas, en sus hábitos, necesidades y demandas en todos los ámbitos. El avance tecnológico trae consigo ingentes oportunidades para atender esas necesidades y demandas —y otras nuevas que irán surgiendo a medida que la sociedad y las personas sigan cambiando— de manera mucho más completa y perfecta y a un coste mucho menor. Esta caída en el coste de los servicios financieros permitirá extenderlos a todos los sectores sociales —incluyendo los más desfavorecidos— en todo el mundo.

La actividad financiera se sitúa en el centro de la economía y es instrumental para múltiples necesidades y demandas clave para la vida de las personas. Por eso, un sistema financiero mucho más eficiente y productivo, atento a los cambios sociales, apoyado en las tecnologías más avanzadas y capaz de servir a todos puede contribuir en gran medida a que las oportunidades de progreso y bienestar que el avance tecnológico ofrece se materialicen y, al tiempo, prosperar con ellas. Esto exige, a su vez, una profunda transformación de la industria financiera, que ya ha comenzado pero que resulta imposible saber cómo se desarrollará más allá del futuro inmediato. Es igualmente imposible pronosticar cómo serán los proveedores de productos y servicios financieros, pero, sin duda, se parecerán muy poco a los bancos actuales. La transformación de la industria amenaza la supervivencia de los bancos actuales, que deben abordar un proceso muy complejo, incierto y radical de adaptación si quieren ocupar un lugar en la industria financiera del futuro.

En este artículo se revisa cómo las tecnologías emergentes pueden afectar a la economía, como paso previo a plantear su impacto en la industria financiera. A continuación, el artículo examina los rasgos fundamentales de la transformación que deben afrontar las entidades financieras y sus reguladores y supervisores para adaptarse al nuevo entorno. Este análisis, necesariamente, se apoya en gran medida en la experiencia de BBVA, que lleva ya casi una década embarcado en un proyecto drástico de transformación.

LA REVOLUCIÓN TECNOLÓGICA Y LA ECONOMÍA GLOBAL

Si atendemos a la conocida definición de revolución tecnológica de Nick Bostrom, como «un cambio radical y relativamente rápido que se produce como consecuencia de la introducción de nueva tecnología» (Bostrom 2006), está muy claro que vivimos una revolución tecnológica, posiblemente de un alcance comparable al de la revolución neolítica que trajo la agricultura y los asentamientos humanos estables, pero mucho más acelerada. La rapidez del ritmo de generación de innovaciones y, sobre todo, de su aplicación y difusión en nuestro tiempo no tiene precedentes históricos.

La velocidad de los cambios en nuestra época se debe a la naturaleza de la revolución tecnológica actual, que tiene su origen en mejoras extremas en la capacidad, velocidad y coste de procesamiento y transmisión de la información, en contraste con otras revoluciones tecnológicas anteriores, centradas en el mundo físico, la producción o el transporte de mercancías.

El origen de esta revolución tecnológica puede situarse a partir de mediados del pasado siglo, con el desarrollo de los primeros computadores, a los que siguieron los ordenadores personales e internet. Desde entonces, se ha venido cumpliendo la ley de Moore, según la cual la capacidad de almacenamiento y proceso de información se ha ido duplicando más o menos cada dieciocho meses (y su coste se ha reducido a la mitad). Este avance exponencial se consiguió inicialmente por el perfeccionamiento y la reducción del tamaño de los dispositivos y después, de manera creciente, en virtud de la interconexión de un número cada vez mayor de estos.

En este proceso han ido surgiendo las «tecnologías exponenciales», así llamadas porque su avance se corresponde con la ley de Moore. Muchas de ellas, como la «movilidad inteligente»; es decir, la capacidad de computación en movilidad, la computación en la nube, los *big data*, el internet de las cosas, las nanotecnologías o los desarrollos de nuevos materiales «inteligentes» contribuyen a su vez a incrementar la capacidad de procesamiento de información y reducir su coste, sosteniendo en el tiempo la vigencia de la ley de Moore. Otras, como la robótica y los drones —o los coches autotripulados—, la impresión en 3D, la realidad virtual o diferentes biotecnologías, muchas de ellas asociadas a la genética, como el *gene editing*, sacan partido del crecimiento exponencial de la capacidad de procesamiento y transmisión de información para avanzar a ritmos hasta ahora inalcanzables.

Erik Brynjolfsson y Andrew McAfee destacan que la actual revolución tecnológica está dando lugar a la «segunda era de las máquinas». La primera, a partir del desarrollo de las máquinas de vapor, superó las limitaciones de la capacidad física humana o animal; la segunda, partiendo del desarrollo de la computación, hace posible superar las limitaciones de la capacidad intelectual de las personas, hasta un punto y con unas consecuencias todavía imprevisibles (Brynjolfsson y McAfee 2014).

Esto último es lo que distingue la actual revolución tecnológica de las anteriores; otros elementos como la aceleración tecnológica, el afloramiento de diferentes tecnologías relacionadas y que pueden combinarse, su impacto sobre los sectores productivos, la sociedad, la política o la vida de las personas no son, en esencia, distintos de lo que ha ocurrido en otras revoluciones tecnológicas, aunque la magnitud y la velocidad de los cambios no sean iguales.





«Siempre habrá abundancia de cosas que calcular en los asuntos detallados de millones de personas dedicadas a tareas complicadas.»

VANNEVAR BUSH (1890-1974)

En el visionario artículo «Cómo podríamos pensar», publicado por la revista estadounidense *The Atlantic Monthly*, en julio de 1945. En español lo publicó por primera vez la *Revista de Occidente*, en mayo de 2001



La diferencia cualitativa —y esencial— es que en esta ocasión las tecnologías emergentes permiten cambiar lo que hasta ahora parecían constantes fundamentales de la naturaleza humana: su memoria, sus procesos cognitivos, sus capacidades intelectuales y físicas e incluso su propia mortalidad. Además introducen incógnitas tan relevantes para la especie como el impacto de un alargamiento brusco y extremo de la esperanza de vida de las personas, o la coexistencia con máquinas de inteligencia comparable o superior a la humana, lo que da lugar a la posibilidad de que se produzca la llamada «singularidad»; esto es, que esas máquinas sean capaces de generar autónomamente otras máquinas de inteligencia todavía superior. En todo caso, la potencia de las nuevas tecnologías y su rápida difusión está cambiando de forma acelerada las industrias, las empresas, los hábitos y los modos de vida de las personas, la cultura y, por tanto, el conjunto de la sociedad. Paralelamente, y como ha ocurrido en otras revoluciones tecnológicas anteriores, está desplazando la frontera de lo posible en la producción y distribución de productos y servicios. Por ello, debería estar generando aumentos notables de la productividad e impulsando fuertemente el crecimiento global.

Sin embargo, y para desconcierto de muchos, en la última década el crecimiento económico global ha sido muy decepcionante. No solo no se ha producido la aceleración que se esperaría como resultado de una revolución tecnológica, sino que ha sido más baja que en la década anterior y muy inferior a la de los 25 años posteriores a la Segunda Guerra Mundial, los más brillantes del siglo pasado —y, posiblemente, de la historia conocida—. Y todo ello a pesar de los esfuerzos de los bancos centrales, que han inyectado cantidades ingentes de liquidez al sistema y han llevado los tipos de interés a niveles sin precedentes, incluso negativos en un extenso tramo de la curva de rendimientos en Europa o Japón.

La debilidad de la recuperación económica tras la última crisis y el escaso optimismo de las previsiones de crecimiento en el futuro inmediato han suscitado mucho debate entre los economistas. Para algunos, a los que podríamos llamar «tecnopesimistas», estaríamos ante una fase de estancamiento, atrapados en un periodo largo de bajo crecimiento de la productividad, el empleo e, incluso, amenazados por el riesgo de deflación y depresión prolongada. Para otros, «tecnooptimistas», nos hallaríamos en una fase de transición, en la que se sufren todavía los impactos retardados de la crisis, un prolongado y difícil desapalancamiento y la debilidad que todavía presentan amplios segmentos del sistema bancario global. Así que, superada esta fase, entraríamos en un periodo de crecimiento mucho más rápido, impulsado por el avance tecnológico.

Hace ya casi tres años, Larry Summers rescató la hipótesis del estancamiento secular de Alvin Hansen, que databa de la década de 1930, destacando la escasez estructural de demanda de inversión en relación al ahorro (Hansen 1938; Summers 2014). Otros economistas, como Robert Gordon, explican el bajo crecimiento por factores de oferta, en particular el agotamiento de la innovación y el consiguiente bajo crecimiento de la productividad (Gordon 2016). Y, por fin, otros, como Thomas Piketty o Joseph Stiglitz, a partir de análisis distintos, acaban centrando el problema en el aumento de la desigualdad, que deprimiría de forma permanente la demanda agregada (Piketty 2013; Stiglitz 2015).

Estas explicaciones no son incompatibles y podrían darse simultáneamente: la combinación de una escasez de demanda agregada de tipo keynesiano, una ralentización de la productividad y una concentración creciente de la renta en los segmentos de más altos ingresos serían razones más que suficientes para que la economía global atravesara un largo periodo de bajo

crecimiento. Sin embargo, existen también poderosas razones contrarias a esta conclusión tan negativa. Primero, las economías emergentes y en desarrollo mantienen para las próximas décadas perspectivas demográficas, de mejora de la productividad y de rentabilidad de las inversiones mucho más favorables, que pueden absorber el exceso de ahorro global e impulsar el crecimiento también en los países desarrollados. Segundo, existen problemas bien conocidos de medición (infravaloración) del PIB, de la inversión y la productividad, asociados al hecho de que las herramientas estadísticas de medición están diseñadas para una economía de «acero y trigo» y no para una economía «digital», en la que los datos y la información son los *inputs* y los *outputs* clave de una parte creciente de la actividad económica (Mokyr 2014). De ser corregidos estos sesgos, puede que ofrecieran una visión distinta del crecimiento futuro. Por otra parte, como señala Joel Mokyr, las revoluciones tecnológicas se desarrollan y dan fruto a lo largo de un periodo largo de tiempo y, frecuentemente, por vías inesperadas.

Brynjolfsson y McAfee creen que estamos en puertas de una fase de fuerte crecimiento, impulsado por máquinas cada vez más inteligentes y omnipresentes, que extraerán el máximo partido de los avances en la computación, las redes cada vez más amplias y tupidas de comunicaciones, la digitalización y la inteligencia artificial, entre otras «tecnologías exponenciales» (Brynjolfsson y McAfee 2014).

La historia económica muestra que otras tecnologías disruptivas anteriores, como la máquina de vapor o la electricidad, por ejemplo, necesitaron tiempo para alcanzar el punto de inflexión en el que su grado de difusión y el aumento de las posibilidades para su aplicación general y flexible, y su combinación con otras tecnologías, cambiaron de forma radical los modos de producción y las condiciones de vida. Según Brynjolfsson y McAfee, las tecnologías digitales están llegando a este punto de inflexión, que marcaría el inicio de lo que Klaus Schwab llama la «Cuarta Revolución Industrial», fruto de la combinación de tecnologías muy poderosas que están borrando los límites entre los ámbitos físico, digital y biológico (Schwab 2016).

Hasta el momento, los grandes ganadores de estos avances han sido los consumidores. La tecnología permite el acceso de un número cada vez mayor de personas a nuevos productos y servicios que mejoran la calidad de vida. Pero, como también señalan Brynjolfsson y McAfee, este proceso puede conducir a un aumento del desempleo y, por tanto, de la desigualdad, porque los avances tecnológicos llevarán a la desaparición de gran número de empleos, sustituidos por máquinas, o simplemente innecesarios, a la vista de que la tecnología permitirá que las personas atiendan de forma autónoma sus propias necesidades.

Esta no es la primera vez en la historia en la que la nueva tecnología se asocia a un aumento de la desigualdad y el desempleo; esta era la idea directriz de los luditas de principios del siglo XIX, y el propio Keynes acuñó el término «desempleo tecnológico» en la década de 1930. No obstante, en el pasado, y siempre después de pronósticos catastróficos, las nuevas tecnologías acabaron generando empleos diferentes, que sustituyeron a los perdidos. Empleos, además, más productivos, que mejoraron las condiciones de vida del conjunto de la población —incluso en un marco general de mayor desigualdad—. Sin embargo, eso solo se produjo tras un difícil periodo de transición. En las circunstancias actuales, esa etapa de ajuste podría ser larga y penosa para amplios sectores de la población, y potencialmente muy conflictiva.

En definitiva, la economía global afronta dos grandes retos, distintos pero relacionados. El primero es fortalecer la demanda agregada y corregir los desequilibrios que lastran el





crecimiento a corto plazo. El segundo, facilitar la transición al nuevo entorno y limitar sus costes. Superar ambos retos exige impulsar ambiciosas medidas de alcance global, que incluyan un impulso fiscal centrado en la inversión en infraestructuras y un amplio conjunto de reformas estructurales para mejorar la flexibilidad de los mercados, con especial énfasis en la movilidad laboral, simplificar la creación de nuevas empresas, reforzar las leyes antimonopolio, estimular el I+D+I y, de manera ya impostergable, mejorar drásticamente los sistemas educativos y promover políticas inclusivas, de forma que el avance tecnológico pueda traducirse en mayor crecimiento y todos puedan participar de esas oportunidades de mayor riqueza y bienestar.

LA REVOLUCIÓN TECNOLÓGICA Y LAS EMPRESAS

Con independencia de las razones por las que el impacto de la revolución tecnológica no se está reflejando todavía en una mejora clara de las cifras macroeconómicas globales, no cabe duda de que sí está cambiando aceleradamente el modo en el que vivimos, trabajamos, nos divertimos, consumimos, nos relacionamos con otros, etcétera. Y esto, por supuesto, está impulsando cambios radicales en los sectores productivos y en las empresas que los componen.

Schwab concluye de todo esto que estamos en el inicio de la Cuarta Revolución Industrial, que se está construyendo a partir de la Tercera, la revolución digital que arrancó a mediados del siglo XX, y que se caracterizaría, fundamentalmente, por la fusión o la combinación de tecnologías que borran los límites entre los ámbitos físico, digital y biológico. Lo que Schwab llama la Tercera Revolución Industrial, con la aparición de internet y el desarrollo de las tecnologías digitales, tuvo un enorme impacto sobre los sectores cuyos *inputs* o *outputs* fundamentales tenían un alto contenido informacional: las comunicaciones, los medios, la música, muchos sectores de distribución, etcétera. Estas industrias han tenido que reinventarse y han obtenido enormes ganancias de productividad y eficiencia, generando nuevos y mejores productos en beneficio de los consumidores.

Con la Cuarta Revolución Industrial, otros sectores, más centrados en el mundo físico, y que hasta ahora habían experimentado cambios notables pero no disruptivos, están comenzando a ver cómo la combinación de tecnologías genera maneras enteramente nuevas de atender a las demandas de sus clientes, que alteran radicalmente la cadena de valor de las industrias. Estos cambios llegan al mercado de la mano de nuevos competidores, ágiles e innovadores, que pueden competir con éxito con las empresas establecidas, mejorando la calidad, la rapidez o el precio de los productos o servicios y proporcionando, en suma, una mejor

experiencia a los clientes. Esta nueva oferta sintoniza con una marea rápidamente creciente de «nuevos» consumidores. La demanda está también cambiando de forma acelerada: los consumidores desarrollan nuevas necesidades y nuevos hábitos, en gran medida a partir del acceso a la información y a la interacción desde dispositivos móviles. Todo esto obliga a las empresas a repensar la forma en la que diseñan, producen y distribuyen productos y servicios, y genera profundos cambios en las propias empresas y en las estructuras de las industrias.

Lo que está ocurriendo con industrias tan basadas en activos físicos y en la atención presencial a los clientes, como la hotelera o la del transporte, con la aparición de nuevos competidores como Airbnb o Uber, muestra que la revolución tecnológica ya no encuentra barreras sectoriales y que ninguna industria está libre de disrupción. Este también es el argumento de Steve Case, que en su famoso libro *The Third Wave* plantea un desarrollo de la revolución tecnológica en olas sucesivas, cada vez más profundas y poderosas (Case 2016). La Primera Ola comenzó en los años 80 del siglo pasado, cuando las primeras compañías de internet conectaron a las personas con la red, creando el *hardware* y el *software* que constituyeron la base del mundo conectado. La Segunda Ola llegó después de la crisis de las compañías dot.com, cuando nuevas empresas, hoy en la cima de la pirámide global, como Google, Facebook o Apple, crearon servicios y redes sociales sobre la base de internet y de la tecnología móvil. Este Segunda Ola es la que ha generado los enormes cambios que hoy observamos en nuestra vida y en nuestro entorno, pero no ha alterado profundamente el núcleo de la economía global.



Actualmente nos encontramos en el comienzo de la Tercera Ola, en la que las transformaciones profundas se extienden a los sectores clave de la economía, casi todos centrados en el mismo «físico» o «real», como la salud, la educación, la energía, el transporte, la alimentación, etcétera, a los que me gustaría añadir, como explicaré más adelante, la industria financiera. El desarrollo de esta Tercera Ola será probablemente distinto y más lento que las dos primeras. Porque afecta a industrias muy consolidadas, con cadenas de producción y distribución muy complejas y con empresas muy poderosas, con frecuencia de ámbito global y, en la mayor parte de los casos, sujetas a una regulación muy amplia y diversa. Por eso, los agentes de la disrupción, las



start-ups, encontrarán más difícil generar un impacto significativo por sí solos, y tenderán a asociarse o colaborar con las empresas establecidas. Y el gran reto de estos es cómo integrar la tecnología en sus estructuras, tan consolidadas —y hasta hoy exitosas—, y en cómo hacerlo en paralelo a los cambios necesarios en la regulación. El papel de los reguladores o, más en general, de los responsables políticos, será fundamental, porque pueden contribuir a que la adopción de las nuevas tecnologías sea más o menos rápida o más o menos armoniosa.

Un mecanismo que se está revelando como clave para la difusión de la tecnología y su traslación a las industrias consolidadas es el desarrollo de plataformas apoyadas en la tecnología que combinan la oferta y la demanda y ponen en contacto a múltiples proveedores y clientes, generando cantidades ingentes de datos, información e interacciones y creando nuevos productos y servicios y formas completamente novedosas de distribuirlos y consumirlos. Los desarrollos asociados a la *sharing economy* o la provisión de bienes y servicios *on demand* son ejemplos claros de cambios sin precedentes en la forma en la que se producen las transacciones entre personas —no solo económicas o comerciales—.

Hoy, las cinco mayores compañías del mundo por capitalización bursátil (Apple, Google [o Alphabet, su empresa *holding*], Microsoft, Amazon y Facebook) son, sustancialmente, plataformas de este tipo. Esto nos da una idea de la magnitud del «tsunami» que afecta a todos los *stakeholders* y a todos los ámbitos de las empresas. En primer lugar, sitúa a los clientes en el centro de toda actividad de las compañías. Encontrar las mejores formas de entrar en contacto con ellos y mejorar su experiencia en la relación con la empresa es la clave para la supervivencia en este nuevo entorno. La tecnología es una herramienta clave para ello, porque todos los productos y servicios, incluso los más «físicos», pueden ser mejorados en las distintas fases de su diseño, producción y distribución con características «digitales» que aumenten su valor percibido por los clientes. La rápida proliferación de nuevas tecnologías, la infinidad de sus posibles combinaciones, la importancia y la enorme abundancia de los datos y la información y de las técnicas para tratarlos para generar mejor información y conocimiento exigen nuevas formas de colaboración entre empresas con diferentes capacidades. Y el cambio radical de los modelos de negocio supone que las habilidades y los talentos necesarios en las empresas, las formas de trabajo, las estructuras organizativas y, más en general, la cultura corporativa tienen que ser profundamente revisados y, en su caso, reinventados.

No podemos hoy percibir adónde nos llevará este proceso, que está en sus inicios. Sobre todo si consideramos que las nuevas y más poderosas tecnologías que se están desarrollando se convierten en herramientas para impulsar el avance científico en la física, las biociencias, la computación o el medioambiente, que, a su vez, darán lugar a nuevas aplicaciones tecnológicas. Pero limitándonos a las tecnologías que hoy ya conocemos, se abren multitud de posibilidades de seguir impulsando la era de cambios que vivimos: la nube y el análisis de *big data*, múltiples avances en robótica, inteligencia artificial, biotecnologías, nuevos materiales, la biometría, la impresión en 3D, la nanotecnología o el lenguaje natural para interactuar con las máquinas.

Estoy convencido de que todo esto nos llevará a una ola sin precedentes de prosperidad, elevará el bienestar en todo el mundo y nos permitirá afrontar los grandes retos de la humanidad: el deterioro medioambiental, el cambio climático, la pobreza y la desigualdad extremas, etcétera. Es imposible pronosticar cómo discurrirá este proceso, la duración del periodo de ajuste para cada uno de los distintos sectores económicos y sociales ni su grado de conflictividad. Pero sí sabemos que obliga a todas las empresas en todas las industrias a

revisar profundamente la forma de trabajar y hacer negocios y a generar una nueva cultura abierta y positiva ante los cambios, dispuesta a cuestionar lo establecido y a vivir en un modo de innovación continua.

LA REVOLUCIÓN TECNOLÓGICA Y LA INDUSTRIA FINANCIERA

La industria financiera, y la banca en particular, tienen características que las hacían candidatas a una digitalización rápida y temprana, principalmente porque sus materias primas fundamentales y sus productos pueden reducirse a dos: datos (o información) y dinero. Y el dinero puede convertirse en apuntes contables, es decir, en datos, en información.

Sin embargo, a pesar de que la banca —y la industria financiera en general— ha cambiado mucho en las últimas décadas, no se ha producido nada similar a la disrupción que han experimentado otros sectores. Se han planteado diferentes razones para ello: el conservadurismo de la mayor parte de las personas en relación con el dinero, que da lugar a niveles históricamente altos de fidelidad de los clientes, junto con las altas tasas de crecimiento y rentabilidad de la industria, que tendían a desalentar la experimentación y el cambio; y, por supuesto, seguramente la más importante, la regulación. La banca es una industria que opera bajo una regulación extremadamente detallada y extensa, lo que, por una parte, limita la libertad de las entidades para emprender innovaciones radicales y, por otra, les protege de la entrada de nuevos competidores.

Pero esto está cambiando. En primer lugar, y fundamentalmente, los clientes hoy son distintos: la crisis ha mermado la reputación de los bancos y reducido la confianza de los clientes en ellos. Y, sobre todo, hay una nueva generación de clientes que han crecido en el mercado digital, que demandan servicios diferentes y nuevas formas de acceder a ellos, y que están más que dispuestos a aceptar servicios bancarios de otro tipo de compañías; de hecho, ya lo están haciendo de manera creciente. Miles de *start-ups* ya están atacando diferentes nodos de la cadena de valor de la banca. Estas compañías no tienen los *legacies* de los bancos, sistemas obsoletos y costosos y estructuras costosas e ineficientes, y pueden extraer el máximo partido de la tecnología. Gracias a esto pueden ofrecer de manera muy ágil y flexible y a un coste reducido una mejor experiencia a sus clientes. Los pagos, los préstamos, las operaciones con valores y la gestión de activos son, probablemente, las áreas de la banca más atacadas. Pero también existen iniciativas con un gran potencial en seguros, depósitos, gestión del riesgo, ciberseguridad, mercados de capitales y otros muchos ámbitos. El número, la variedad y la escala de estas compañías está creciendo muy rápidamente; un informe de McKinsey estima que podrían hacer perder a los bancos hasta el 60% de sus ingresos en financiación de consumo, el 35% en pagos o préstamos a pequeñas y medianas empresas, el 30% en gestión de activos o el 20% en hipotecas (McKinsey 2015).

Al mismo tiempo, los fundamentos económicos del negocio bancario han cambiado. Las elevadas tasas de crecimiento y rentabilidad de los primeros años de este siglo son, definitivamente, cosa del pasado: el entorno actual de tipos muy bajos de interés podría todavía extenderse durante varios años y el marco regulatorio de la banca se ha hecho mucho más estricto, con mayores exigencias de capital y liquidez, así como de transparencia y protección del consumidor. Todo ello incrementa la necesidad y la urgencia de una





transformación de la banca que incremente de forma drástica su productividad y su eficiencia. Esa transformación generará enormes beneficios para los usuarios, en términos de calidad, variedad y precio de los productos. Y permitirá acceder a los servicios financieros a muchos millones de personas de menor renta en todo el mundo, mejorando su calidad de vida y sus oportunidades para prosperar. En términos macroeconómicos, la transformación de la banca representa una potente reforma estructural: el abaratamiento de los recursos, la mayor eficiencia y agilidad de todos los servicios y su mayor adecuación a las necesidades de los usuarios contribuirán de forma relevante a impulsar el crecimiento y reducir la desigualdad y la pobreza (González 2015). Estamos, por tanto, en marcha hacia una nueva y mejor industria financiera; pero todavía no sabemos cuál será su configuración final, ni si los bancos tendrán en ella una posición relevante o ninguna en absoluto.

Los bancos tienen algunas desventajas claras: estructuras muy costosas y poco flexibles, procesos lentos y complejos, bases tecnológicas obsoletas, culturas corporativas inadecuadas para el mundo digital. Además, están alejados de los ámbitos donde se están desarrollando las últimas tecnologías y las innovaciones más disruptivas; por ello, tienen un acceso más difícil al talento que las hacen posibles.

Pero, en cambio, mantienen a la inmensa mayoría de los clientes y manejan una gran riqueza de datos sobre ellos, tienen las infraestructuras que les permiten producir y distribuir una amplia gama de productos y servicios, tienen recursos financieros mucho mayores, las licencias que exige la regulación y, sobre todo, un conocimiento profundo del negocio financiero.

Por su parte, los nuevos entrantes son flexibles, creativos, innovadores y están perfectamente encajados en el mundo tecnológico, pero no tienen los clientes, ni la infraestructura necesaria para conseguirlos, ni marcas consolidadas, ni la experiencia en el negocio bancario. Otros potenciales competidores, las grandes compañías digitales como Facebook, Apple, Google o Amazon, podrían estar interesados en entrar en el negocio financiero para completar su oferta a sus clientes y participar en una actividad que genera contactos recurrentes y un gran volumen de información sobre las personas; y, sin duda, tienen los clientes, la marca y los recursos económicos para suplir cualquier insuficiencia de infraestructura o del conocimiento del negocio. Sin embargo, hasta ahora, la industria financiera no ha sido una prioridad para ellos, probablemente por su reticencia a entrar en un sector tan estrechamente regulado. De hecho, hasta ahora los competidores digitales han atacado segmentos muy específicos de la cadena de valor bancaria; no han sido capaces de desarrollar una oferta amplia. E incluso operando en ese ámbito restringido, con mucha frecuencia necesitan un banco convencional para poder hacer llegar sus productos a los clientes. Por su parte, los grandes nombres de la red hasta ahora solo han hecho incursiones relativamente marginales en el ámbito financiero. No obstante, esto seguramente acabará cambiando a medida que avancen las aplicaciones tecnológicas para la industria y la regulación vaya adaptándose al nuevo entorno.

Los bancos, por tanto, todavía tienen un cierto margen de tiempo para resolver sus carencias actuales y situarse en condiciones de hacer valer las ventajas que aún mantienen. Pero esto requiere un proceso largo, costoso y, sobre todo, complejo, porque no solo implica una renovación tecnológica radical, sino también, y principalmente, una profunda transformación organizativa y cultural. Los elementos clave que determinarán si los bancos, bajo una forma u otra, sobrevivirán a la revolución tecnológica son tres: primero, la rapidez del





avance tecnológico y de su penetración en la actividad financiera, tanto entre proveedores de servicios como, sobre todo, entre los clientes; segundo, la regulación, que será un factor que marque la velocidad del proceso de cambio en la industria y, en gran medida, la dirección que tome en muchos ámbitos; y, tercero, la rapidez, la decisión y el acierto con los que los bancos —o algunos de ellos— emprendan el proceso de transformación. Estos elementos se desarrollan brevemente en los siguientes epígrafes.

TECNOLOGÍA, CLIENTES Y EL FUTURO DE LA INDUSTRIA FINANCIERA

¿Qué van a querer los clientes de los nuevos proveedores digitales de servicios financieros? En definitiva, lo que necesitan los clientes es un servicio ágil y rápido —crecientemente en tiempo real—, a un coste competitivo y personalizado, es decir, ajustado a sus necesidades. Y, por supuesto, en un entorno seguro en el que sus datos estén protegidos. Esto significa, hoy, proporcionar una experiencia omnicanal completa a los clientes, con la posibilidad de cambiar sin ninguna fisura (*seamless*) de un canal a cualquier otro. Y, muy especialmente, ofrecer las mejores soluciones móviles, que permitan resolver ágilmente todos los aspectos de cualquier consulta o transacción. En todo caso, la experiencia digital del cliente habrá de ser completa de principio a fin para cualquier servicio o producto, en el que además deberá tener la capacidad de contribuir a su diseño y a definir sus características de acuerdo con sus preferencias. Los sistemas de seguridad tendrán que ofrecer una altísima eficacia y, al mismo tiempo, resultar ágiles, cómodos y muy poco intrusivos para el cliente. Y, por último, demandarán otros servicios, más allá de los bancarios convencionales, que todavía están por definir. Pero, entre ellos, sin duda, acceso fácil al mundo P2P, de forma que los clientes puedan utilizar su banco para cualquier interacción o transacción con otras personas: hoy, pagos y préstamos y, en el futuro, otros muchos servicios.

Las tecnologías que permiten ofrecer todo esto ya están aquí; sus desarrollos ulteriores y su adopción creciente abren la puerta a cambios hoy inimaginables, con enormes ganancias en la variedad y la calidad de los servicios ofrecidos y en la productividad de todas las operaciones. Entre las tecnologías que, en este momento, están incidiendo de manera más directa en la transformación de la industria y que van a afectar a su configuración en un futuro próximo quisiera destacar:

La computación móvil o los móviles inteligentes, que ofrecen cada día mayores funcionalidades y se están convirtiendo progresivamente en el canal preferido de acceso de los clientes a los bancos. En Estados Unidos más del 30% de los clientes prefiere utilizar la banca móvil, con una clara ventaja sobre los que todavía prefieren las sucursales (24%).

La biometría, que permite la identificación segura sin necesidad de documentación o presencia física, salvando así uno de los

últimos obstáculos para el desarrollo de un banco totalmente digital a través de cualquier dispositivo.

La computación en la nube facilita inmensamente la transformación digital, porque permite ofrecer servicios de computación de manera escalable y muy eficiente en todo el mundo. Ofrece grandes ventajas en costes y, especialmente, en agilidad, posibilitando ciclos de innovación acelerados. Las mayores empresas digitales, como Google, Amazon, Facebook o Apple, se han construido sobre este tipo de estructuras, e incluso las ofrecen a terceros para aprovechar sus enormes economías de escala.

A partir de estas infraestructuras se han desarrollado los modelos de plataformas digitales, en los que se ofrecen productos y servicios que proporcionan diferentes productores. La actividad digital, que está aumentando de forma exponencial, enormemente impulsada por los teléfonos móviles y, de manera creciente, por multitud de dispositivos conectados, en lo que se conoce como «internet de las cosas», genera información que puede ser explotada, entre otros propósitos, para comprender mejor el comportamiento de los agentes del mercado. El análisis de *big data* extrae a gran velocidad información, es decir, valor de esos ingentes volúmenes de información. Los *big data* permiten, además, procesar información de naturaleza muy diferente, no solo información estructurada (estadísticas, indicadores, etcétera), sino también desestructurada (flujos de navegación en la red, contenidos de las redes sociales, etcétera).

La tecnología *blockchain* o de registros distribuidos presenta un potencial enorme de cambio en el negocio financiero. Es, en suma, una contabilidad pública entre pares que no exige ninguna autoridad, control central o intermediario (Karp 2015). Esto cambia las reglas del juego en muchos ámbitos de la actividad financiera —y en otras industrias, para la gestión de cualquier tipo de activos, digitalizados o físicos—, e impulsará nuevos modelos de negocio que desafíen la posición de la banca actual, porque ataca directamente a su función como intermediarios. Pero también permite automatizar muchos procesos bancarios que implican un uso intensivo de mano de obra y genera nuevas fuentes de negocio.

Otra tecnología clave para el desarrollo de la banca será la inteligencia artificial o, con más precisión, «las tecnologías cognitivas», que tienen el potencial de cambiar radicalmente la vida de las personas y, por supuesto, la manera de hacer banca. Esta es más bien una





familia de tecnologías con aplicaciones muy diversas (Stanford 2016), desde tareas rutinarias (automatización inteligente de procesos), en las que consigue gran ahorro de costes y mejora de la calidad y la rapidez, hasta operaciones más complejas. Entre estas últimas destacan por su potencial disruptivo el desarrollo de «interfaces conversacionales», que mejoran la experiencia del usuario; el *automated complex reasoning*, que posibilita la toma de decisiones de forma totalmente automatizada a partir de datos del contexto o de comportamientos y es fundamental para el desarrollo de «asesores robóticos» o *roboadvisors*, que permiten suplir la presencia humana incluso en operaciones complejas; o el *deep learning*, que abre la puerta al desarrollo de sistemas mucho más rápidos y avanzados para diversos fines, como la detección de fraude, el *risk scoring*, la definición de *clusters* dinámicos de clientes, la construcción de escenarios de estrés artificiales y muchos más. La inteligencia artificial también es fundamental para el desarrollo de procesamiento de lenguaje natural, que permite que los ordenadores puedan sostener una conversación con seres humanos, lo que aceleraría enormemente la digitalización de los clientes.

Todo esto ya está cambiando la industria financiera. En gran medida, porque los nuevos competidores pueden atacar segmentos concretos del negocio, sacando partido de varias de algunas de estas tecnologías disruptivas y apoyándose en otras para reducir el coste y el tiempo exigidos para construir las infraestructuras básicas necesarias para el procesamiento de datos, la producción, la distribución, etcétera. Como resultado, la industria financiera se está fragmentando. A los más de 20.000 bancos que ya existen en el mundo se unen, cada año, centenares de operadores nuevos. Y, por otro lado, la industria se está desagregando (*unbundling*) en la medida en que estos nuevos operadores muy especializados rompen la cadena de valor de la banca ofreciendo productos o servicios centrados en segmentos muy específicos de esa cadena.

¿Serán permanentes estas tendencias? Seguramente no. Por una parte, el sistema bancario global padece desde hace tiempo una clara sobrecapacidad, agravada en los años recientes por la debilidad de los ingresos y la caída de la rentabilidad. Esta situación se está agravando con la nueva concurrencia, con la caída de costes y precios que trae aparejada la revolución tecnológica y también con las dificultades tecnológicas y culturales de la mayor parte de los bancos para adaptarse al nuevo entorno digital. Por consiguiente, cabe esperar la desaparición de un gran número de bancos y de *start-ups*, cuya tasa de mortalidad es siempre muy alta. De este modo, el cambio tecnológico traerá, al fin, la consolidación drástica que el sector necesita hace tiempo.

Por otra parte, la conveniencia de los usuarios reclama soluciones mucho más globales e integradas para sus necesidades, lo que apunta hacia una reagregación (*rebundling*) de la oferta. En un entorno tan complejo y cambiante, reagregar la oferta exigirá sumar productos y servicios de diferentes proveedores. La experiencia en otras industrias sugiere que esto se conseguirá a través de plataformas donde diferentes proveedores competirán y, frecuentemente, cooperarán para ofrecer la mejor experiencia posible a sus usuarios. Estas plataformas deberán disponer de un *front-end* muy conveniente y muy fácil de usar que «sepa» cómo combinar productos y servicios para adaptarse a las necesidades o deseos específicos de cada cliente en cada momento.

Muy probablemente, se desarrollarán diferentes tipos de plataformas; algunas de ellas serán proveedoras de funcionalidades, normalmente enfocadas para otros negocios o

empresas, que podrían incluso ofrecer lo que se llama «banca como servicio», es decir, toda la infraestructura y los procesos necesarios para desarrollar la actividad bancaria. Otras serán plataformas entendidas como punto de encuentro o mercado, dirigidas a clientes finales. Posiblemente, la conveniencia del usuario impondrá una tendencia hacia plataformas «universales», donde se ofrecerá toda la gama de servicios financieros y otros no financieros. En paralelo, o como una etapa en el desarrollo de esas plataformas universales, habrá también un buen número de plataformas especializadas en diferentes segmentos del negocio bancario, que podrían coexistir e interactuar con las más generalistas.

Es previsible que, gradualmente, se produzca un proceso de reducción del número de estas plataformas, debido a las enormes economías de escala y de alcance que puedan generarse. Y la pregunta clave es: ¿quién ocupará el centro de estas plataformas, de la misma manera que hoy lo hace, por ejemplo, Amazon? Este jugador central será «dueño» de la plataforma, en el sentido de que establecerá las reglas, será responsable de su mantenimiento y mejora y validará las transacciones que se produzcan en ella. Por consiguiente, participará de los ingresos que generen esas transacciones y tendrá acceso y controlará la información que se genere en torno a ella, lo que en definitiva representa otra enorme fuente de valor. Evidentemente, la competencia por alcanzar esta posición será muy dura; en ella concurrirán las más exitosas *start-ups* ya creadas o por crear —que habrían experimentado un crecimiento exponencial—, los bancos que mejor sepan adaptarse al nuevo entorno y, probablemente, algunos de los grandes jugadores digitales actuales. Para tener éxito entre tanta competencia serán necesarias —aunque seguramente no suficientes— dos condiciones fundamentales: primero, disponer de las más avanzadas capacidades en las tecnologías exponenciales sobre las que la plataforma estará construida; segundo, tener una excelente reputación, basada en la prudencia, transparencia y la ausencia absoluta de conflictos de interés, que le permita ganarse la confianza de los clientes. De entre los bancos actuales, muy pocos alcanzarán esta posición, solo algunos de los que emprendan con decisión y acierto una transformación radical. Los demás desaparecerán, serán absorbidos o languidecerán gradualmente con un número cada vez más reducido de clientes. Algunos podrían convertirse en proveedores de infraestructuras, bancos que ofrecen sus servicios como «marca blanca» a otras empresas que son los que tienen la relación con los clientes.

HACIA UNA NUEVA REGULACIÓN Y SUPERVISIÓN «DIGITALES»

Históricamente, la regulación ha desempeñado un papel clave en la evolución del sector financiero. Sus objetivos tradicionales han sido garantizar la estabilidad del sistema, evitar o minimizar los efectos de las crisis bancarias y proteger a los consumidores. Y también, aunque cada vez con menos frecuencia, obligar a los bancos a colaborar en la consecución de otros objetivos de política económica: la industrialización, el impulso de determinados sectores o, incluso, aliviar la carga de la deuda pública. La promoción de la competencia no ha pasado a ser una consideración relevante hasta una fecha relativamente reciente. Y, desde luego, el impulso a la innovación no ha figurado nunca entre las mayores preocupaciones de los reguladores; por el contrario, las innovaciones financieras han sido frecuentemente vistas con sospecha, otorgando más peso a los riesgos que presuntamente pudieran plantear para la estabilidad o la





protección del consumidor que a los beneficios de poder ofrecer mejores servicios financieros a menor coste.

Todo esto, unido a las barreras que la propia regulación impone para la entrada de nuevos concurrentes, ha hecho que el desarrollo de los sistemas financieros haya tendido a reflejar con retraso el avance tecnológico y los cambios sociales que trae consigo, y siempre dentro de una senda de innovación incremental, con muy escasos episodios disruptivos. Esta es una explicación clave del retraso en la digitalización de la banca, en comparación con otros sectores, a pesar de que su naturaleza es muy apropiada para una adopción temprana.

Sin embargo, esto está cambiando. La percepción por parte de los reguladores de la importancia de un sistema financiero competitivo y eficiente para impulsar el crecimiento económico, el bienestar de los usuarios y la propia estabilidad del sistema ha ido ganando peso. Hoy, además, encontramos factores muy poderosos que promueven ese cambio de percepción aunque sea de forma muy gradual. Está, por un lado, el enorme potencial, cada vez más ampliamente reconocido, de las tecnologías exponenciales para mejorar la calidad, la conveniencia y el precio de los servicios financieros, con grandes beneficios para los consumidores y para el crecimiento económico. Este potencial se percibe, si cabe de manera más aguda, en el momento actual, en el que los tipos de interés nulos o negativos no consiguen impulsar el crédito. Las ganancias drásticas de productividad a partir de la tecnología permitirán mejorar la transmisión de la política monetaria, reduciendo el coste del capital.

Por otro lado, está la aparición de nuevos concurrentes para ofrecer servicios financieros específicos de forma más flexible y eficiente, apoyados en la explotación de las capacidades tecnológicas (*fintech*), así como los cambios en los consumidores, cada vez más dispuestos a contratar estos servicios de «no bancos». Y está, por último, la presión de los propios bancos para que se supriman las limitaciones que les impiden competir de forma más eficaz con las *fintech*. Así, en los últimos años, distintas autoridades han suavizado la regulación para impulsar la competencia, sobre todo en los segmentos de la actividad financiera que no comprometen de forma directa su estabilidad. Esto ha favorecido la incursión de nuevos concurrentes en ciertos nichos, como los pagos minoristas.

No obstante, aprovechar plenamente las ventajas potenciales de la tecnología exige una regulación mucho más amplia y sistemática. Y, a día de hoy, esa regulación no existe, lo que crea amplias zonas de alto riesgo potencial para los objetivos básicos de los reguladores, la estabilidad macroeconómica y financiera y la protección del consumidor, incluyendo la de sus datos, así como todo lo relacionado con el lavado de dinero y la financiación de actividades ilegales como el terrorismo.

Hace falta, por tanto, una regulación que equilibre adecuadamente el valor para los clientes de las nuevas propuestas digitales con la protección frente a los riesgos asociados. Y que pondere adecuadamente los riesgos para la estabilidad macroeconómica y financiera frente a las ganancias en eficiencia de los nuevos modelos de negocio. Al mismo tiempo, la regulación debe crear —y la

supervisión debe velar porque se respete— un entorno competitivo en el que productos o servicios financieros similares reciban un tratamiento similar, con independencia del tipo de entidades —bancos establecidos o nuevos entrantes— que los suministren. Afortunadamente, muchos reguladores y supervisores están dando pasos en esta dirección. Sin embargo, son numerosos los frentes que hay que atender y todavía pocos los recursos disponibles con la preparación adecuada. Por eso, los reguladores y supervisores, además de reforzar su capital humano «digital» y estrechar su diálogo con las entidades que están avanzando en la transformación digital, tendrán que concentrar sus esfuerzos en las áreas de mayor impacto sobre la configuración de la futura industria de servicios financieros. Entre ellas quiero citar muy brevemente, en primer lugar, las tecnologías que podríamos llamar «facilitadores digitales» (*digital enablers*), porque están en la base de casi cualquier servicio digital y requerirán una regulación que permita su utilización segura: el análisis de *big data*, la ciberseguridad o la identidad digital, es decir, el desarrollo de sistemas eficientes y seguros de identificación remota. En segundo lugar, están las tecnologías que pueden alterar radicalmente la configuración de la infraestructura del sistema financiero, como la computación en la nube o *blockchain*. Y, en tercer lugar, los reguladores deben reflexionar acerca de cómo tratar los nuevos modelos de negocio que están surgiendo, como los mecanismos alternativos de financiación (los préstamos P2P, el *crowdfunding*, las plataformas o mercados en línea, etcétera) y diferentes modalidades o grados de provisión de «banca como servicio».



Todos estos son elementos destacados en un panorama muy amplio y complejo de temas a resolver, para lo que se precisan enfoques muy transversales y flexibles, porque la innovación financiera «digital» será siempre más rápida que los ciclos de revisión regulatoria. Por otra parte, dada la naturaleza de la actividad financiera, en gran parte supraterritorial y muy fácilmente deslocalizable, estos enfoques deberían tener un alcance global. Por ello, la definición y la supervisión «digital» futuras requerirán un alto grado de convergencia y colaboración entre las autoridades responsables en distintos países, así como un diálogo constante, transparente y constructivo con la industria. La forma en la que se construyan la



regulación y la supervisión digitales determinará la rapidez y, en gran medida, el rumbo que tome la transformación de la industria financiera. Por consiguiente, será clave para asegurar la estabilidad financiera y macroeconómica en las próximas décadas y para conseguir que el sistema financiero se convierta en un motor del crecimiento y de la mejora del bienestar de muchos millones de personas en todo el mundo.

HACIA LA BANCA EXPONENCIAL: LA EXPERIENCIA DE BBVA

BBVA está trabajando en un ambicioso proceso de transformación desde el año 2007, cuando comenzamos a hacer importantes inversiones para renovar nuestra infraestructura tecnológica.¹ Hemos hecho progresos sustanciales desde entonces, aunque, por supuesto, este ha de ser un proceso continuo para mantener el ritmo del cambio tecnológico acelerado. Nuestra plataforma tecnológica permite hoy trabajar en tiempo real, gestionar un ecosistema colaborativo con diversos desarrolladores, desplegar una arquitectura mucho más avanzada de ciberseguridad y protección de datos y extraer un mayor conocimiento de nuestros datos y convertir este conocimiento en productos y servicios, con una reducción drástica del *time to market*.

En paralelo a estos avances, pronto comprendimos que la transformación suponía un proceso mucho más complejo, que implicaba a todos nuestros procesos, nuestro capital humano y nuestra cultura corporativa. Y que para avanzar en todos estos frentes necesitábamos cambiar también nuestras estructuras organizativas. En 2014, definimos una división específica de Banca Digital, para que asumiera la gestión de este proceso y acelerara la transformación. Pronto percibimos progresos significativos y que podríamos avanzar a más velocidad. En consecuencia, en 2015 cambiamos hacia una estructura organizativa completamente nueva, que situaba la transformación como un foco clave en todos los negocios y todas las áreas de apoyo, con dos objetivos fundamentales: impulsar los resultados en todos los negocios del grupo en el corto y medio plazo y dotar a todos los ámbitos del grupo de todos los recursos y competencias necesarios (humanos y tecnológicos) para competir con éxito en la nueva industria bancaria. Esta estructura ha acelerado nuestro avance en nuevos canales, productos y servicios, ha favorecido la incorporación de nuevo talento que completa nuestras capacidades digitales y ha acelerado el desarrollo de una cultura corporativa más ágil, flexible, emprendedora y colaborativa.

Esto ya se refleja en el cambio de nuestras maneras de trabajar cada vez más orientadas a proyectos a cargo de equipos flexibles y multidisciplinares, la extensión de las metodologías *agile* y el uso cada vez más amplio de *scrums*. Los cambios en nuestra cultura corporativa y nuestra forma de trabajar se han visto también impulsados por nuestras nuevas sedes, que actúan como palancas de transformación, favoreciendo el trabajo colaborativo como vía para aflorar la inteligencia colectiva y estimular la innovación. De esta forma, el cambio en las formas de trabajo se ha impulsado simultáneamente desde tres entornos: la tecnología, la cultura (o los comportamientos) y el espacio físico.

También nos hemos esforzado por acercarnos a los ámbitos donde las nuevas tecnologías y aplicaciones se están desarrollando: mantenemos diversos esquemas de colaboración con empresas de vanguardia y hemos desarrollado una ambiciosa política de inversiones en otras que puedan aportarnos conocimientos y capacidades especiales. Paralelamente hemos

Herzog & de Meuron
Sede corporativa
de BBVA en Madrid,
España. Conocida
como La Vela, es
el icono del nuevo
BBVA





construido equipos que están desarrollando un esfuerzo de investigación muy importante en campos como el diseño, la construcción de arquitectura de datos, el análisis de *big data*, la ingeniería de procesos, etcétera.

En todo este complejo proceso es clave no olvidar que el foco último debe ser el cliente. Lo que intentamos es definir nuestra relación con el cliente. Por una parte, poniendo la tecnología y la información a su servicio y, por otra, concentrando nuestros esfuerzos en ampliar y mejorar nuestra relación con él. Para ello, tenemos que convertirnos en un banco del conocimiento, con los datos como base para conocer mejor a nuestros clientes y ayudarles a comprender mejor sus propias necesidades financieras, facilitar su proceso de toma de decisiones y poner a su disposición soluciones personalizadas. Todo ello de forma ágil, flexible, transparente y a un precio adecuado, generando la mejor experiencia posible para ellos. Todo esto supone redefinir nuestra propuesta de valor, apoyando a nuestros clientes a lo largo de toda su vida financiera, y ayudándoles a conseguir sus aspiraciones. Y también orientar nuestros esfuerzos a democratizar la oferta de servicios financieros; la tecnología permite ofrecerlos a un coste asequible a muchos millones de personas que hoy no pueden acceder a ellos. Esto es lo que refleja nuestro propósito: «Poner al alcance de todos las oportunidades de esta nueva era». Y esto es lo que en BBVA llamamos «banca exponencial»: banca apoyada en las tecnologías exponenciales para ampliar exponencialmente la superficie de contacto con el cliente y la información sobre ellos que multiplique los servicios que ofrecemos y su calidad y, en definitiva, que expanda de manera exponencial el negocio y le otorgue un alcance verdaderamente global.

Una transformación tan radical y poderosa solo puede tener éxito si está guiada por una visión clara; un liderazgo comprometido y unos principios firmes de prudencia, integridad y transparencia frente a todos los *stakeholders* de la empresa. Porque, en definitiva, de lo que se trata es de ganarse y mantener la confianza del cliente, que es, al final, lo que decidirá quiénes son los ganadores en la futura industria financiera.



NOTAS

1. Para un desarrollo más amplio, aunque sin duda menos actualizado de la transformación de BBVA, véase González 2014.

BIBLIOGRAFÍA

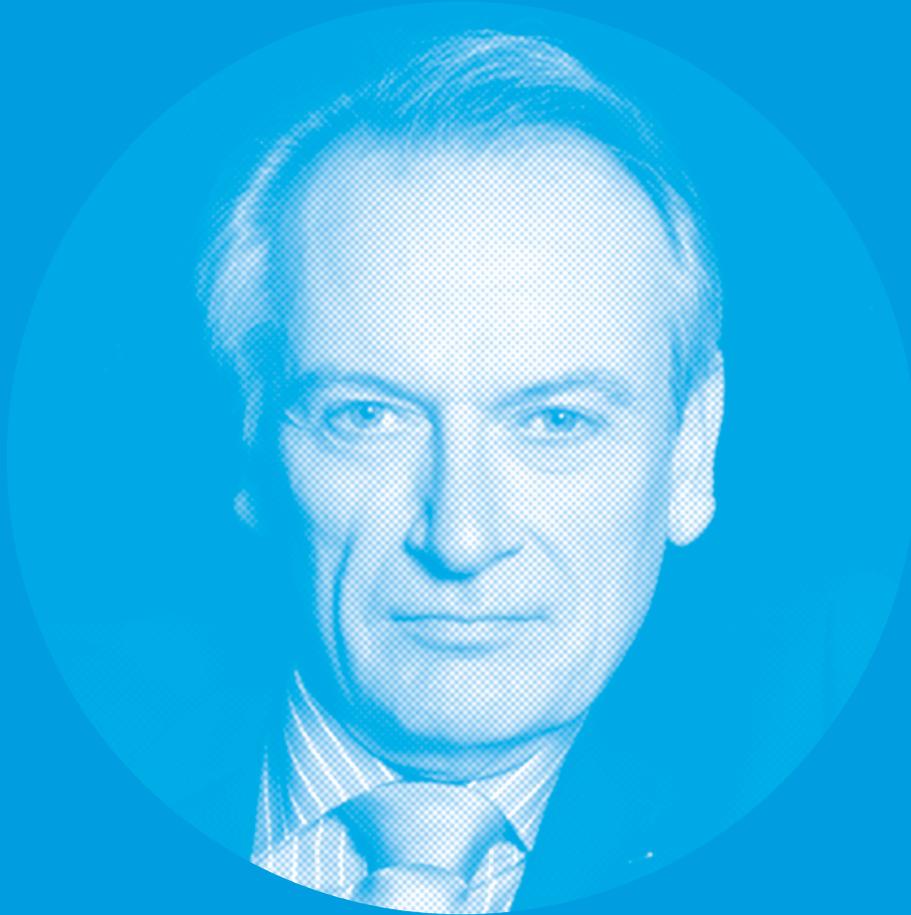
- Banco Central Europeo, «Financial Stability Review», noviembre de 2015.
- Bostrom, N., «Technological revolutions: Ethics and Policy in the Dark», 2006, en Cameron, N. M. de S. y Mitchell, M. E. (eds.), *Nanoscale: Issues and Perspectives for the Nano Century*, Hoboken, John Wiley & Sons, 2007, pp. 129-152.
- Brynjolfsson, E. y McAfee, A., *The Second Machine Age. Work, Progress, and Prosperity in a Time of Brilliant Technologies*, Nueva York, W. W. Norton & Company, 2014.
- Case, S., *The Third Wave: An Entrepreneur's Vision of the Future*, Nueva York, Simon & Schuster, 2016.
- Fondo Monetario Internacional, «Global Financial Stability Review», octubre de 2015.
- González, F., «La Transformación de una Empresa Analógica en una Empresa Digital: el caso de BBVA», en *Reinventar la Empresa en la Era Digital*, Madrid, BBVA, 2014.
- González, F., «Europa, entre el Estancamiento y la Revolución Tecnológica. La Banca Digital como Motor del Crecimiento», en *La Búsqueda de Europa. Visiones en Contraste*, Madrid, BBVA, 2015.
- Gordon, R., *The Rise and Fall of American Growth: The U.S. Standard of Living since the Civil War*, Princeton, Princeton University Press, 2016.
- Hansen, A. H., «Economic Progress and Declining Population Growth», en *American Economic Review*, vol. 29, n.º 1, 1938, pp. 1-15.
- Karp, N., «Tecnología de cadena de bloques (blockchain)», en *Situación Económica Digital*, julio de 2015.
- Lipton, A., Schrier, D. y Pentland, A., *Digital Banking Manifesto: the End of Banks*, Connection Science and Engineering, MIT, Massachusetts Institute of Technology, 2016.
- McKinsey, «The Fight for the Consumer», en *McKinsey Global Banking Annual Review 2015*.
- Mokyr, J., «Secular Stagnation? Not In Your Life», en Teulings, C. y Baldwin, R., *Secular Stagnation; Facts, Causes and Cures*, Londres, CEPR Press, 2014, pp. 93-90.
- Piketty, T., *Capital in the Twenty-First Century*, París, editions du Seuil, 2013; Londres, Harvard University Press, 2013.
- Schwab, K., *The Fourth Industrial Revolution: What it Means, How to Respond*, Ginebra, World Economic Forum, 2016.
- Stanford University, «Artificial Intelligence and Life in 2030. One Hundred Year Study on Artificial Intelligence: Report of the 2015-2016 Study Panel», Stanford, Stanford University, 2016. <https://ai100.stanford.edu/2016-report>
- Stiglitz, J., *Rewriting the Rules of the American Economy: An Agenda for Growth and Shared Prosperity*, Nueva York, Roosevelt Institute, 2015.
- Summers, L., «U. S. Economic Prospects: Secular Stagnation, Hysteresis, and the Zero Lower Bound», discurso pronunciado ante la Economic Policy Conference de la National Association for Business Economists, febrero de 2014.



Pasado, presente y futuro del dinero, la banca y las finanzas

CHRIS SKINNER

Imagen de apertura:
Andy Warhol
Dollar Sign, c. 1981
Tinta de serigrafía y pintura de polímero
sintético sobre lienzo
35,56 x 27,94 cm
The Andy Warhol Foundation for the
Visual Arts, Inc., Nueva York, EEUU



Chris Skinner
Financial Services Club, Essex, Reino Unido

Conocido comentarista independiente sobre mercados y tecnologías financieras a través de su blog *thefinanser.com*, es autor del *best seller Digital Bank* y su continuación, *ValueWeb*. En la actualidad es presidente del foro europeo de redes Financial Services Club. Forma parte del comité asesor de distintas compañías, entre las que se incluyen Innovate Finance, Moven y Meniga. Ha sido elegido una de las personas más influyentes en la banca (y uno de los mejores bloqueros) por *The Financial Brand* y una de las 40 personas más influyentes en tecnología financiera por *The Wall Street Journal's Financial News*.

La historia del dinero está envuelta en sexo, religión y política, esas cosas de las que nos dicen que no hablemos. Después de todo, son los temas que gobiernan nuestras vidas, y el dinero está en el corazón de los tres. Para poner esto en contexto, qué mejor que hablar de los orígenes de la humanidad, que es lo que me propongo analizar en esta reflexión. De hecho, los orígenes del dinero reflejan los orígenes de la humanidad. Como se verá, ha habido tres grandes revoluciones en la historia humana coincidiendo, respectivamente, con la formación de comunidades, la creación de civilizaciones y el nacimiento de la industria. Hoy vivimos una cuarta gran revolución y estamos a punto de iniciar una quinta. Esto es importante porque a cada revolución humana le ha seguido otra de los intercambios monetarios y de valor. Por eso hay que reflexionar sobre el pasado, para entender el presente y predecir el futuro.

PRIMERA EDAD. LA INVENCIÓN DE CREENCIAS COMPARTIDAS

Hace siete millones de años aparecen en África los primeros antepasados de la humanidad y siete millones de años más tarde, mientras escribo esto, arqueólogos rastrean la existencia del ser humano en Sudáfrica, donde creen haber encontrado algunos eslabones perdidos en nuestra historia. Una historia que nos hace retroceder hasta los primeros homínidos. ¿Que qué es un homínido?

Retrocedamos bastante, al momento en que los científicos creen que las placas tectónicas eurasiática y americana colisionaron y después se asentaron, creando una gigantesca planicie en África después de la Edad de las Glaciaciones. Esta gigantesca nueva llanura se extendía cientos de kilómetros, hasta donde alcanzaba la vista, y los simios que la habitaban de repente descubrieron que no había árboles a los que trepar. Solo tenían tierra llana, y hierba y bayas como único alimento. Para los simios resultaba muy duro recorrer en tropel cientos de kilómetros apoyados en manos y pies, así que empezaron a erguirse. Esto produjo un cambio en las conexiones cerebrales que, a lo largo de miles de años, dio paso a las formas tempranas de lo que ahora se reconoce como ser humano.

El primer eslabón para comprender esta cadena fue el descubrimiento de Lucy. Llamado así por la canción de los Beatles *Lucy in the Sky with Diamonds*, es el primer esqueleto que pudo recomponerse para demostrar cómo estos parientes tempranos del hombre aparecieron





en las llanuras de África, en el mundo posterior a la Edad de las Glaciaciones. El esqueleto lo encontró el paleoantropólogo Donald Johanson en Etiopía a principios de la década de 1970, y es un ejemplo de los primeros homínidos australopitecos, de una antigüedad aproximada de 3,2 millones de años. El esqueleto presenta un cráneo pequeño, similar al de la mayoría de los simios, además de indicios de una forma de caminar bípeda y erguida, parecido al de los humanos y el resto de homínidos. Esta combinación apoya la idea de que, en la evolución humana, el bipedismo precedió al aumento de tamaño del cerebro.

Desde el hallazgo de Lucy se han hecho muchos otros descubrimientos asombrosos en lo que ahora se llama Cuna de la Humanidad, en Sudáfrica, nombrada Patrimonio de la Humanidad por la Unesco. Recibió esta distinción cuando en 1997 Ron Clarke encontró un esqueleto de australopiteco casi intacto al que llamaron Little Foot (pie pequeño), de unos 3,3 millones de años de antigüedad. ¿Por qué fue tan importante Little Foot? Porque apenas se han encontrado restos fósiles de homínidos así de completos. El motivo es que los huesos se esparcían por la superficie terrestre a medida que la tierra que cubría el suelo se iba hundiendo y los restos óseos se repartían por las cuevas porosas subterráneas. Por tanto, existen las mismas probabilidades de encontrar un esqueleto intacto que un disco decente del dúo musical Jedward. Más recientemente, los arqueólogos han descubierto las cuevas Rising Star, donde se han encontrado numerosos esqueletos enteros, por lo que los científicos creen que se trataba de un lugar de enterramiento. También ha dado nombre a un nuevo pariente de los humanos, el *Homo naledi*. En definitiva, el árbol genealógico de la humanidad englobado por el término genérico *Homo*, dentro del cual nosotros pertenecemos a la especie *Homo sapiens*, tiene muchas otras ramas, como *Homo erectus*, *Homo floresiensis*, *Homo habilis*, *Homo heidelbergensis*, *Homo naledi* y *Homo neanderthalensis*.

Es entonces cuando surge la pregunta: si hubo varias especies de humanos, ¿por qué solo quedamos nosotros? Parte de la explicación hay que atribuirla a cambios evolutivos. Después de todo, ya no quedan mamuts ni tigres de dientes de sable, pero sí sobreviven varias especies de descendientes suyos. Pero lo que es interesante de los homínidos, de acuerdo con el profesor Yuval Harari, autor de *Sapiens. De animales a dioses* y una autoridad en historia de la humanidad, es que los *Homo sapiens* sobrevivimos a las otras especies de homínidos porque teníamos la capacidad de trabajar juntos en grupos de miles de individuos. Según esta teoría, el resto de las especies humanas se reunía en tribus de 150 miembros como mucho —el tamaño máximo aproximado de cualquier colonia de simios—, porque pasada esta cifra había un exceso de machos alfa y el orden del grupo se desbarataba. Una parte del grupo, entonces, seguía a un macho alfa y otra parte a otro. La tribu se divide y sigue caminos separados.

El *Homo sapiens* se desarrolló más porque podíamos hablar con nuestros semejantes y crear un paisaje de información complejo, no limitado a gruñidos y signos, y empezamos a construir relatos. A través de los relatos podíamos compartir creencias y, al compartir creencias, cientos de nosotros,

no solo un centenar, pudimos cooperar dentro de una misma tribu. El resultado es que, cuando los poblados de *Homo sapiens* eran atacados por otras especies de homínidos, podíamos repelerlos con facilidad y también atacarlas y aniquilarlas. Y eso hicimos. Los neandertales, que comparten casi el 99,5% de nuestro ADN, se extinguieron hace 40.000 años y fueron la variación *Homo* que sobrevivió. Después de eso, solo quedamos seres humanos o, si lo prefieren, *Homo sapiens*.

Ahora bien, ¿por qué es importante esto como base histórica para las cinco edades del hombre? Porque fue la primera edad. Fue la edad de la luz. La edad de los dioses. La edad de adorar a la Luna y al Sol, la Tierra y los mares, al fuego y al viento. Los recursos naturales de la Tierra tenían un fuerte poder simbólico, con los pájaros del cielo, los grandes felinos y las serpientes del subsuelo como símbolos esenciales de la humanidad primitiva. Compartíamos estos relatos y estas creencias y, al hacerlo, podíamos trabajar juntos para construir civilizaciones. Una de las religiones más antiguas que existen en el mundo es el hinduismo, de alrededor de tres mil años de historia, pero hubo otras antes del hinduismo en Jericó, Mesopotamia y Egipto. El dios Sol y la diosa Luna eran las creencias compartidas básicas, y eran importantes porque servían para mantener el orden. Gracias a ellas podíamos trabajar juntos en grupos cada vez más numerosos.

Por eso hay muchos elementos comunes en los relatos del Antiguo Testamento de la Biblia y los del Corán. Judíos, cristianos y musulmanes comparten la creencia en las historias de Adán y Eva, Moisés, Sodoma y Gomorra y Noé, algunas de ellas incluso proceden de la primitiva visión hinduista del mundo.

Las creencias compartidas son el elemento central que mantiene unidos a los humanos. Lo que nos permite trabajar juntos y llevarnos bien, o no, según los casos. La diferencia fundamental en nuestras creencias compartidas, por ejemplo, es lo que impulsa hoy a Daesh y da lugar al fundamentalismo islámico, algo en lo que muchos musulmanes no creen en absoluto.

Volveré sobre este tema, ya que la creación de la banca y el dinero gira en torno a la creencia compartida de que estas cosas son importantes y tienen valor. Sin esa creencia, la banca, el dinero, los gobiernos y las religiones no tendrían ningún poder. Carecerían de sentido.





LA SEGUNDA EDAD DEL HOMBRE: LA INVENCIÓN DEL DINERO

Así pues, el hombre se volvió civilizado y dominante por su capacidad para trabajar en grupos de cientos de individuos. Esta característica era exclusiva del *Homo sapiens* y nos permitió desarrollar creencias comunes en el Sol, la Luna, la Tierra y, más tarde, en Dios, los santos y los sacerdotes.

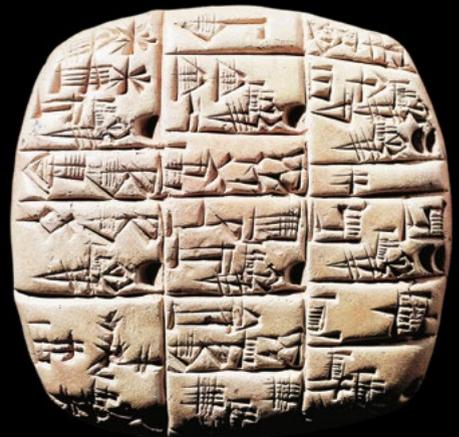
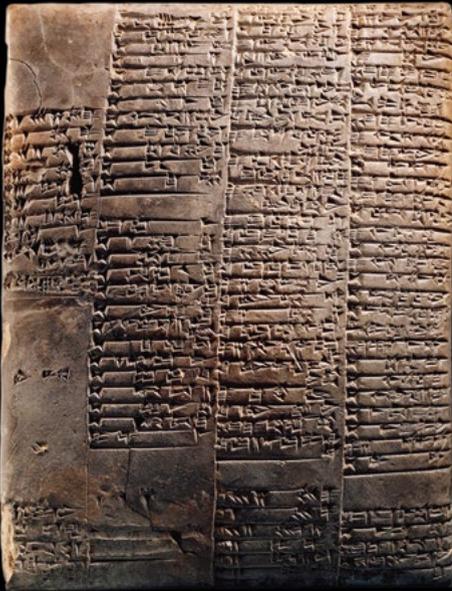
Con el tiempo, a medida que las creencias comunes nos iban uniendo, sentimos la necesidad colectiva de tener líderes. He aquí un elemento diferencial básico entre humanos y monos. Por ejemplo, cuando preguntaron al antropólogo Desmond Morris si los simios creían en un dios, respondió categóricamente que no. Morris, un ateo, escribió una obra fundamental en la década de 1960 llamada *El mono desnudo* en la que afirmaba que el hombre, a diferencia de los simios, «creía en una vida después de la vida porque parte de la recompensa obtenida por nuestros trabajos creativos es la creencia de que, a través de ellos, seguiremos “viviendo” después de la muerte».

Esta es una parte de nuestra estructura de creencias compartidas que nos permite trabajar juntos, vivir juntos y reunirnos en grupos de cientos de miles. De manera que la religión se convirtió en un elemento fundamental del orden y la estructura esenciales del ser humano, y nuestros líderes fueron aquellos que más se acercaban a nuestras creencias: los sacerdotes en los templos. Sin embargo, a medida que el hombre se establecía en comunidades y empezaba a tener una estructura organizada, surgieron nuevos problemas. Históricamente, el hombre había sido nómada y se desplazaba de un lugar a otro, siguiendo las estaciones, en busca de alimento y forraje. Cuando escaseaban nuestras provisiones de alimentos o cuando otras comunidades tenían cosas mejores, ideamos un sistema de trueque para intercambiar artículos de valor. Tú tienes piñas, yo tengo maíz, vamos a intercambiarlos. Tú tienes cuentas de colores brillantes, yo tengo piedra resistente y sílex, vamos a comerciar. El trueque funcionaba y permitía que diferentes comunidades prosperaran y sobrevivieran.

Después se formaron grandes ciudades. Algunos dicen que la ciudad más antigua del mundo aún en pie es Jericó, que puede datar de hace más de 10.000 años. Otros apuntan a Eridu, una ciudad de Mesopotamia cercana a la actual Basora, en Irak, con 7.500 años. Sea como sea, se trata de ciudades milenarias. Cuando se fundaron estas ciudades, miles de personas se reunieron y asentaron en ellas porque podían acoger un modo de vida complejo y civilizado. Si tomamos Eridu como ejemplo, veremos que la ciudad se formó porque atrajo a tres antiguas civilizaciones: la cultura samarra, procedente del norte; la cultura sumeria, que constituyó la civilización más antigua de la humanidad, y la cultura semita, que había sido históricamente un pueblo nómada y ganadero. Los sumerios fueron los inventores del dinero. El dinero: una nueva estructura de creencias compartidas que crearon los líderes religiosos para mantener el control.

En la antigua Sumer, los sumerios inventaron el dinero porque el sistema de trueque se vino abajo. Y esto se debió a que los humanos empezaron a asentarse en grupos de mayor tamaño y a dedicarse a la agricultura. Las estructuras de la agricultura y los asentamientos trajeron consigo una revolución en la forma de actuar de los humanos. Antes, los individuos recolectaban y cazaban; ahora se habían asentado y cultivaban juntos la tierra. La agricultura dio lugar a abundancia y la abundancia provocó el desmoronamiento del sistema de trueque. El trueque no funciona cuando todo el mundo tiene piñas y maíz.

Distintas tablillas
sumerias de carácter
contable con
escritura cuneiforme
(c. 3000-2000 a.C.)



No puedes intercambiar algo que ya tienen otros. Así que era necesario un nuevo sistema, y los líderes del momento, o los gobiernos, si se prefiere, lo inventaron. Inventaron el dinero. El dinero es el mecanismo para controlar la sociedad y la economía. Los países con dinero tienen economías respetables; los que no lo tienen, no.

¿Cómo pueden Estados Unidos y el Reino Unido tener billones de dólares de deuda y conservar una clasificación de crédito triple A? Porque, dada su condición de centros financieros globales, cuentan con buenos flujos monetarios asociados a sus economías que cimentan nuestras estructuras de creencias compartidas.

Como sostiene el profesor Yuval Noah Harari: «La única característica verdaderamente exclusiva del [*Homo sapiens*] es nuestra capacidad para crear y creernos ficciones. El resto de los animales hace uso de sus sistemas de comunicación para describir la realidad. Nosotros usamos el nuestro para crear nuevas realidades. Desde luego que no todas las ficciones son compartidas por todos los humanos, pero al menos una de ellas ha llegado a ser universal, y se trata del dinero. Los billetes de dólar no tienen ningún valor en absoluto, salvo en nuestra imaginación colectiva, pero todo el mundo cree en el billete de dólar». ¿Y cómo inventaron los sacerdotes esta creencia compartida y la hicieron viable?

Sexo.

Había dos dioses en la antigua Sumer: Baal, el dios de la guerra y los elementos, e Ishtar, la diosa de la fertilidad. Ishtar hizo que la tierra fuera fértil en cosechas, además de proporcionar el placer y el amor:

Alabada sea Ishtar, la más temible de las diosas.
Reverenciamos a la reina de las mujeres, la mayor de las deidades.
Está envuelta en placer y amor.
Rebosa vitalidad, encanto y voluptuosidad.
Sus labios son dulces, hay vida en su boca.
En su presencia el gozo es total.

Esta era la clave de la cultura sumeria: crear dinero para que los hombres pudieran gozar con Ishtar. Los hombres entraban en el templo y ofrecían sus abundantes cosechas a los sacerdotes. Los sacerdotes guardaban las cosechas en los almacenes para tiempos de carestía, un seguro contra el invierno, cuando la comida escasea, y contra las malas cosechas asociadas a plagas y sequías. A cambio de sus bienes, los sacerdotes daban dinero a los agricultores. Una creencia compartida en una nueva forma de valor: la moneda. ¿Qué se podía obtener con esa moneda? Sexo, por supuesto. El historiador griego Heródoto describió cómo funcionaba:

Toda mujer del país acudía una vez en su vida al templo del amor, donde tenía [...] relaciones con cualquier extraño [...] los hombres pasan y hacen su elección. No importa cuál sea la suma de dinero, la mujer no podrá negarse, ya que eso sería pecado, y mediante este acto el dinero se convierte en algo sagrado. Después de la cópula ella se ha convertido en santa a ojos de la diosa y puede partir a su casa. A partir de entonces no hay soborno, por generoso, que sirva para pagar a una de estas mujeres. Así, las mujeres altas



y guapas quedan pronto libres para marchar, mientras que las poco agradecidas tienen que esperar mucho tiempo porque no pueden cumplir con la ley: algunas de ellas llegan a permanecer en el templo tres o cuatro años.

Así pues, el dinero era sagrado y todas las mujeres tenían que aceptar que debían prostituirse al menos una vez en su vida. Por eso Ishtar era conocida también con otros nombres, como Har y Hora, de donde proceden las voces inglesas *harlot* (ramera) y *whore* (puta).

De ahí que la prostitución sea el oficio más antiguo del mundo y la contabilidad, el segundo. El dinero se creó para sustentar la religión y los gobiernos, al desarrollar una nueva estructura de creencias compartidas que permitían a la sociedad producir excedentes de bienes y alimentos, y seguir llevándose bien aun después de haberse desmoronado el trueque.

LA TERCERA EDAD: LA REVOLUCIÓN INDUSTRIAL

El uso del dinero como unidad de intercambio paralela al trueque duró cientos de años o, para ser más exactos, unos 4.700 años. Durante este tiempo se utilizaron como dinero cuentas de vidrio, anillos, plata, oro y otros bienes valiosos, así como hierro fundido y otros materiales. Tal vez, la forma de dinero más chocante es la de las islas Yap, en el Pacífico, donde se usan piedras. Este último ejemplo es el favorito de los libertarios del *bitcoin* para ilustrar cómo funciona el intercambio de valor y para explicar cómo se puede traducir esto en intercambio digital en la cadena de bloques, puesto que no es más que un registro de adeudos y abonos. El problema es que la piedra, el oro y la plata son una unidad de intercambio bastante pesada. Por eso, a medida que la revolución industrial avanzaba a toda máquina, se hizo necesaria una nueva.

He usado la metáfora «avanzar a toda máquina» en este contexto de forma deliberada, ya que la secuencia temporal de la revolución industrial es paralela al desarrollo de la máquina de vapor. Esta energía fue patentada por primera vez en 1606, cuando Jerónimo de Ayanz y Beaumont obtuvo una patente por un aparato capaz de extraer el agua de las minas mediante una bomba. La última patente para dispositivos a vapor se registró en 1933, cuando George y William Besler patentaron un aeroplano impulsado por vapor.

La edad del vapor generó numerosas innovaciones, pero la que transformó el mundo fue la máquina de vapor. Gracias a ella, los trenes de pasajeros y de carga pudieron desplazarse de costa a costa y de continente a continente. Pasar de la energía animal a la de vapor permitió a los barcos cruzar océanos y a los trenes atravesar países. Dio lugar a la creación de fábricas que podían caldearse y alimentar sus máquinas, y a toda una serie de transformaciones que culminaron con el desarrollo de la electricidad y las telecomunicaciones a finales del siglo XIX. El paso del vapor a la electricidad nos alejó de la maquinaria pesada y nos trajo estructuras energéticas y de comunicaciones más ligeras y sencillas de manejar. De modo que la revolución industrial terminó cuando nos mudamos de las fábricas a las oficinas, pero entre 1606 y 1933 hubo cambios profundos en el mundo del comercio.

En el curso de estos cambios resultó evidente la necesidad de una nueva unidad de intercambio, ya que transportar grandes cargas de lingotes de oro no solo resultaba arduo, era una invitación al asalto y al robo. Hacía falta algo nuevo. Ya se habían producido varias innovaciones en el mundo, los banqueros Medici inventaron la financiación del comercio



«El dinero es como
un sexto sentido sin
el que no se pueden
utilizar plenamente los
otros cinco.»





y los chinos ya usaban papel moneda desde el siglo IX. Pero estas innovaciones no se impusieron hasta que la revolución industrial así lo requirió. Y esta revolución exigía una nueva forma de intercambiar valor.

De ahí que los gobiernos del mundo comenzaran a autorizar y dar licencias a bancos que hicieran posibles los intercambios económicos. Estos bancos empezaron a surgir en el siglo XVIII y se organizaban como entidades de respaldo gubernamental en las que se podía confiar para que custodiaran valores en nombre de los depositantes. Por este motivo son bancos las empresas más antiguas registradas en la mayoría de las economías. La institución financiera británica más antigua que aún subsiste es el Hoares Bank, fundado por Richard Hoare en 1672. El banco británico de cierta entidad más antiguo es el Barclays Bank, que cotizó por primera vez en 1690. La mayoría de los bancos del Reino Unido tienen más de doscientos años de antigüedad, algo poco común ya que, según un estudio del Banco de Corea, solo existen 5.586 empresas de más de doscientos años y la mayoría están en Japón.

Bancos y aseguradoras han sobrevivido tanto como grandes entidades (y no deja de llamar la atención que sigan siendo grandes y estén operativas después de dos o tres siglos) porque son instrumentos de comercio para los gobiernos. Están respaldados y autorizados por estos para actuar como lubricante financiero de nuestras economías, y la principal innovación a que dieron lugar fue la creación de un papel moneda respaldado por el gobierno como unidad de intercambio. Como parte de este nuevo ecosistema se crearon billetes de banco y cheques en papel, para facilitar las operaciones de la industria. En su momento, semejante propuesta debió de resultar de lo más sorprendente. ¿Un trozo de papel en lugar de oro como pago? Pero no fue tan terrible. Quizá este fragmento de un texto del Comité de Banqueros Escoceses nos proporcione una perspectiva apropiada de cómo despegó todo esto:

El primer banco escocés que emitió billetes fue el Banco de Escocia. Cuando este banco se fundó, el 17 de julio de 1695, por ley del parlamento de Escocia, había pocas reservas de moneda escocesa y su valor era inestable comparado con las divisas inglesa, holandesa, flamenca o francesa, que preferían la mayoría de los escoceses. La expansión del comercio escocés se vio gravemente obstaculizada por carecer de una divisa adecuada; y los comerciantes de la época, que buscaban un modo más conveniente de liquidar sus cuentas, estaban entre los promotores más activos de una alternativa.

Se concedió al Banco de Escocia el monopolio de la banca en Escocia durante 21 años. Inmediatamente después de su inauguración, en 1695, el banco amplió el sistema monetario con la introducción del papel moneda.

En un principio esta idea se recibió con cierta suspicacia. Sin embargo, una vez que quedó claro que el banco podía cumplir sus «promesas de pago» y que el papel era más cómodo que las monedas, la aceptación se generalizó y se incrementó el número de billetes en circulación. Cuando la costumbre se extendió de los comerciantes al resto de la población, Escocia se convirtió en uno de los primeros países en usar papel moneda. ¿Y qué hay del talonario? La Cheque & Clearing Company del Reino Unido nos proporciona la siguiente descripción:



En el siglo XVII se usaban letras de cambio para pagos locales y operaciones internacionales. Los cheques, una especie de letra de cambio, empezaron a evolucionar. En un principio se conocían como «órdenes de efectivo», ya que permitían a un cliente retirar, a su requerimiento y de manera inmediata, fondos que había depositado a cuenta en su banco [...] el Banco de Inglaterra fue pionero en el uso de formularios impresos, el primero se imprimió en 1717 en Grocers' Hall, Londres. El cliente tenía que presentarse personalmente en el Banco de Inglaterra y conseguir un impreso numerado en caja. Una vez cumplimentado, el impreso tenía que ser autorizado por el cajero antes de llevarlo al empleado que realizaría el pago. Estos documentos se imprimían en papel de «cheque» para evitar fraudes. Solo los clientes con crédito tenían derecho a este papel especial, y los documentos impresos servían como garantía de que era un cliente fiable del Banco de Inglaterra.

En los últimos años del siglo XVII se vivieron tres innovaciones importantes de manera simultánea. Los gobiernos otorgan a los bancos licencias para emitir billetes y órdenes de efectivo, es decir, cheques, de modo que el papel sustituya a las monedas y las mercancías de valor. Después, el sistema bancario alimentó la revolución industrial, no solo facilitando el comercio de valores de intercambio gracias a estos sistemas que operan con papel, también permitiendo estructuras de comercio y de financiación a través de sistemas similares a los que todavía utilizamos. En tercer lugar, la primera bolsa de valores se fundó en Ámsterdam en 1602, y en los siglos posteriores se dio una explosión bancaria para facilitar el comercio y respaldar a las empresas y los gobiernos en la creación de economías saludables y en expansión. Un papel que, se supone, tendrían que seguir desempeñando hoy en día. Durante este tiempo aparecieron el papel moneda y los productos de inversión estructurados, y empezaron a desarrollarse empresas internacionales que operaban con mucho volumen gracias al alza de las manufacturas a gran escala y a las conexiones globales.

Así que a lo largo de la revolución industrial se produjo una evolución desde los orígenes del dinero, basado en un sistema de creencias compartidas, a la creación de confianza en un nuevo sistema: el papel. La clave de los sistemas de billetes y cheques en

papel es que contienen una promesa de pago que creemos que será cumplida. Un billete de banco promete pagar a su portador en nombre del banco de un país y a menudo va firmado por el presidente del banco central de dicho país. Un cheque suele ser un reflejo de la sociedad de cada época, y nos muestra lo vinculados que estaban estos sistemas de intercambio de valores a la era industrial.

En resumen, tenemos tres cambios de gran calado en la sociedad a lo largo del pasado milenio: la creación de civilización a partir de creencias compartidas, la creación del dinero sustentada en esas mismas creencias y la evolución de ese dinero de la confianza a la economía, momento en que los gobiernos respaldaron a los bancos con papel moneda.

LA CUARTA EDAD DEL HOMBRE: LA ERA DE LA RED

La razón de hablar en profundidad sobre la historia del dinero era proporcionar una información básica para entender lo que está pasando hoy. El dinero se origina como un mecanismo para que los gobernantes de la antigua Sumer pudieran controlar a los agricultores, basándose en unas creencias compartidas. Luego, durante la revolución industrial se estructuró en instituciones respaldadas por los gobiernos, es decir, bancos, que podían emitir billetes de papel y cheques que serían tan valiosos como oro o monedas, apoyándose también en creencias compartidas. Creemos en los bancos porque los gobiernos dicen que son de confianza y los gobiernos los usan como mecanismo de control de la economía.

Al pasar al *bitcoin* y a la era digital, veremos cómo internet está poniendo algunos de estos fundamentos en tela de juicio. Retrocedamos un poco para ver cómo surgió la era de internet. Unos dirían que se remonta a Alan Turing, la máquina Enigma y el test de Turing, o incluso más atrás, a la década de 1930, cuando la Oficina Polaca de Cifrado descodificó por primera vez textos militares alemanes con la máquina Enigma. Enigma fue sin duda la máquina que llevó a la invención del ordenador contemporáneo, ya que los criptógrafos británicos crearon un ordenador digital electrónico programable llamado Colossus capaz de descifrar los mensajes en código alemanes. Colossus lo diseñó el ingeniero Tommy Flowers, no Alan Turing (este diseñó una máquina diferente), y estaba operativo en Bletchley Park desde febrero de 1944, dos años antes de que apareciera el ordenador estadounidense ENIAC. ENIAC, acrónimo en inglés de Integrador y Ordenador Numérico Electrónico, fue el primer ordenador electrónico de uso general. Fue diseñado por el ejército de Estados Unidos para usos meteorológicos (previsión del tiempo) y construido en 1946. Cuando apareció ENIAC, los medios lo llamaron El Cerebro Gigante, por su velocidad mil veces superior a la de cualquier máquina electromecánica de





su tiempo. ENIAC pesaba más de 30 toneladas y ocupaba una superficie de unos 170 m². Podía procesar 385 instrucciones por segundo. Comparado con un iPhone6, que puede procesar 3.500 millones de instrucciones por segundo, era una tecnología rudimentaria, pero estamos hablando de hace unos setenta años, cuando aún ni se había planteado la ley de Moore.

Lo importante es que Colossus y el ENIAC fijaron las bases de toda la informática moderna, que empezó a ser una industria de éxito en la década de 1950. Tal vez les sorprenda saber que, en 1943, el entonces presidente de IBM, Thomas Watson, predijo que habría un mercado mundial para tal vez cinco ordenadores. Teniendo en cuenta el tamaño y el peso de estas máquinas infernales, se comprende que pensara así. Con todo y con eso, ¡cómo han cambiado las cosas! Pero aún estamos en los albores de la revolución de la red y no voy a extenderme más en la historia de los ordenadores. Mi intención al mencionar a ENIAC y Colossus era más bien poner en perspectiva el actual estado de constante cambio. La informática lleva setenta años transformando nuestro mundo.

Considerando que desde la aparición de la energía del vapor hasta la última patente relacionada con esa clase de energía transcurrieron 330 años, aún nos quedan muchos cambios por delante. Examinemos primero la cuarta edad más en profundidad, ya que la diferencia fundamental entre ella y la inmediatamente anterior es el colapso de tiempo y espacio. A Einstein le daría la risa, pero es cierto que hoy ya no estamos separados por el tiempo y el espacio como lo estábamos antes. Las distancias son más cortas cada día, y es gracias a nuestra conectividad global. Podemos hablar, relacionarnos, comunicarnos y comerciar globalmente, en tiempo real, prácticamente gratis. Puedo hacer una llamada de Skype, sin apenas coste, a cualquier persona del planeta. Además, gracias a la rápida disminución de los costes de la tecnología, se pueden encontrar teléfonos inteligentes por un dólar; el *smartphone* más barato del mundo es probablemente el Freedom 251, un Android con una pantalla de 4 pulgadas que cuesta solo 251 rupias en India, unos 3,75 dólares. En otras palabras, lo central en nuestra revolución es que podemos producir ordenadores muchísimo más potentes de lo que nunca haya existido antes y ponerlos en las manos de cualquiera en el mundo de modo que todo el planeta esté en la red.

Una vez en la red, tenemos el efecto red, que crea posibilidades exponenciales, ya que ahora todos podemos comerciar, hacer transacciones, hablar y relacionarnos de manera personalizada (*one-to-one*) y de igual-a-igual (*peer-to-peer*).

La red es la cuarta edad, la del hombre y el dinero, después de una primera de comunidades dispersas y nómadas, una segunda de asentamiento e invención de la agricultura y una tercera de viajar por países y continentes, hasta la actual, en la que estamos conectados de forma global e interdependiente. Es una transformación, y nos demuestra que el hombre está pasando de tribus aisladas a comunidades conectadas y de ahí a una plataforma única: internet.



El centro de datos de Facebook de Prineville, Oregón, es uno de los cuatro centros desde los que la red social da servicio a más de 1.500 millones de usuarios activos

Lo crucial es que cada uno de estos cambios nos ha llevado a replantearnos cómo comerciamos, intercambiamos y, por lo tanto, financiamos. Nuestro sistema de creencias compartidas permitió que el trueque funcionara hasta que la abundancia terminó con él, y por eso creamos el dinero. Nuestro sistema monetario se basa en acuñar moneda, algo impracticable en una era industrial en vertiginosa expansión, y por eso creamos la banca, para que emitiera papel moneda. Ahora estamos en la cuarta edad, y la banca ya no funciona como debería. Los bancos son locales, pero la red es global; los bancos se estructuran alrededor del papel, mientras que la red se estructura alrededor de datos; los bancos se organizaban en edificios y con personal humano, la red opera a través de *software* y servidores. Por eso despierta tanto interés general, porque estamos a punto de asistir a la transformación del dinero y los bancos a otra cosa. Sin embargo, en cada edad anterior, ese algo diferente no sustituyó lo que había, sino que se sumó a ello.

El dinero no sustituyó al trueque, lo redujo. La banca no sustituyó al dinero, lo redujo. En la edad de la red nada va a sustituir a la banca, pero sí la reducirá. Vamos a poner en contexto lo que significa esta reducción.

Reducir. El trueque sigue manteniéndose al máximo nivel, más o menos el 15% del comercio mundial se realiza mediante trueque, pero es poco significativo si lo comparamos con los flujos de capital. El dinero en su forma física también está operativo a unos niveles nunca vistos (el uso de efectivo sigue creciendo en la mayoría de las economías), pero no es muy alto comparado con las formas alternativas de flujos digitales de dinero y en los mercados de divisas y de valores. En otras palabras, los sistemas históricos de intercambio de valor siguen teniendo una presencia enorme, pero representan un pequeño porcentaje en el comercio frente a las nuevas estructuras que hemos puesto en marcha para permitir que fluya el valor. Por este motivo me interesa particularmente lo que sucederá en la era de la red, al estar conectados de forma interdependiente y en tiempo real, porque se generarán nuevos flujos gigantescos de comercio para mercados que no tenían el nivel de servicio adecuado o habían pasado desapercibidos. Fijémonos en África. Los usuarios de móvil africanos están tan apegados al monedero digital como los patos al agua. Una cuarta parte de todos los usuarios de móvil africanos tiene monedero digital, una cifra que se extiende a casi toda la población en comunidades más vibrantes económicamente como Kenia, Uganda y Nigeria. Esto se debe a que estos ciudadanos nunca antes habían tenido acceso a una red, no disponían de un



mecanismo de intercambio de valor, salvo el medio físico, demasiado expuesto al fraude y al crimen. África está superando a otros mercados a la hora de proporcionar inclusión financiera por móvil casi las 24 horas del día. Lo mismo sucede en China, India, Indonesia, Filipinas, Brasil y muchos otros mercados con un servicio insuficiente. Así que el primer cambio sustancial en el efecto red de inclusión financiera es que los 5.000 millones de personas que antes tenían acceso nulo a servicios digitales ahora están en la red.

Un segundo cambio importante es la naturaleza de las divisas digitales, criptodivisas, *bitcoin* y contabilidades compartidas. Esta es la parte que está creando los nuevos raíles y conductos para la cuarta generación de las finanzas, toda una reconfiguración cuyo funcionamiento aún está por ver. ¿Se basarán todos los bancos en una cadena de bloques R3? ¿Se harán todas las compensaciones y pagos a través de Hyperledger? ¿Qué papel tendrá el *bitcoin* en este nuevo ecosistema financiero? Todavía no conocemos las respuestas a esas preguntas, pero lo que nos vamos a encontrar es un ecosistema diferente en el que perderá relevancia el papel de los bancos históricos, que tendrán que demostrar si pueden estar a la altura de los nuevos retos.

La cuarta edad del dinero es una estructura de valor digital en red que está conectada digitalmente y de manera casi gratuita en tiempo real y de alcance global. Se basa en la idea de que todo está conectado, empezando por las operaciones de los 7.000 millones de humanos que se comunican y comercian en tiempo real globalmente y terminando por sus 3.000 millones de máquinas y dispositivos, todos los cuales tienen su propia inteligencia. Esta nueva estructura obviamente no puede funcionar en un sistema construido para papel con edificios y seres humanos, y lo más probable es que se convierta en nueva capa que se añadirá a la estructura existente. Una nueva capa de inclusión digital, que supere las deficiencias de la vieja estructura. Una nueva capa donde se realizarán miles de millones de transacciones y se transferirán valores en cantidades mínimas a la velocidad de la luz. En otras palabras, la cuarta edad es aquella en la que todo puede transferir valor de manera inmediata y a partir de cantidades tan pequeñas como la billonésima parte de un dólar, si fuera necesario.

Esta nueva capa para la cuarta edad, por tanto, no se parece a nada que hayamos visto antes, y cuando se instale, complementará y reducirá al mismo tiempo el sistema existente. En medio siglo es muy probable que nuestra percepción del sistema bancario actual sea la misma que ahora tenemos del dinero en efectivo y el trueque, a saber, que son métodos de transacción anticuados, de edades anteriores de la historia del hombre y del dinero. Esta cuarta edad es la de la digitalización del valor, y en ella los bancos, el efectivo y el trueque seguirán existiendo, pero su presencia será muy inferior en el nuevo ecosistema. Tal vez sigan procesando volúmenes incluso mayores que en el pasado, pero en el contexto del sistema total de intercambio de valor y comercio, su papel será menor.

En conclusión, no espero que los bancos desaparezcan, pero sí que surja un nuevo sistema que podría incluir a algunos bancos, pero también nuevos operadores que serán verdaderamente digitales. Tal vez sean los Google, Baidu, Alibaba y Facebook o quizá sean los Prosper, Lending Club, Zopa y SoFi. Desconozco la respuesta y, si me gustara apostar, diría que se tratará de un híbrido de todos ellos que se irá desarrollando a medida que vayan evolucionando en la cuarta edad del dinero. En este híbrido los bancos son parte de un nuevo sistema de valor que incorpora divisas digitales, inclusión financiera, micropagos e intercambios de igual-a-igual, porque es lo que demanda la era de la red. Requiere que todo



lo que lleve un chip incorporado tenga la capacidad de realizar transacciones en tiempo real de manera casi gratuita. Aún no ha llegado ese momento, pero, como dije, esta revolución está dando sus primeros pasos. Solo tiene setenta años. La última revolución tardó 330 años en consolidarse. Demos unas décadas más a esta nueva era y entonces sabremos realmente lo que hemos creado.

LA PRÓXIMA EDAD DEL DINERO. EL FUTURO

Con las cuatro edades del dinero que hemos analizado, a saber, trueque, monedas, papel y chips, ¿cuál podría ser la quinta?

Cuando no hemos hecho más que empezar en el internet de las cosas (IoT) y estamos construyendo un internet del valor (*ValueWeb*), ¿cómo podemos imaginar lo que vendrá después de este ciclo de diez años? Pues sí que podemos y debemos, porque ya hay personas imaginando cómo será el futuro. Personas como Elon Musk, que considera que la colonización de Marte y los medios de transporte superinteligentes de altísima velocidad son objetivos realizables. Personas como los ingenieros de Shimizu Corporation, que planean construir estructuras urbanas en los océanos. Personas como los chicos de la NASA, que están lanzando sondas espaciales equipadas para enviarnos fotos en alta definición de Plutón, un planeta cuya existencia hace cien años solo suponíamos.

Hace un siglo, Einstein propuso un continuo espaciotemporal, que ha quedado demostrado un siglo después. ¿Qué se descubrirá, demostrará y producirá dentro de un siglo? Nadie lo sabe, y la mayoría de las predicciones son bastante funestas. Hace un siglo se avanzaron muchísimas ideas, pero nadie había pensado aún en el ordenador, de modo que la revolución de la red era algo inimaginable. Un siglo antes de eso, los victorianos creían que la solución al problema de los excrementos de caballo en las calles eran los caballos a vapor, ya que aún nadie había pensado en los automóviles. Así pues, quién sabe lo que estaremos haciendo dentro de un siglo.

2116. ¿Cómo será el mundo en 2116?

Tenemos algunas pistas. Sabemos que llevamos décadas pensando en robots, y que en 2116 serán una presencia ubicua y generalizada, algo que ya está demostrando IBM. Sabemos que dentro de un siglo viajaremos por el espacio, porque los hermanos Wright inventaron los viajes aéreos hace cien años y solo hay que ver hasta dónde hemos llegado hoy. Emirates ofrecerá el vuelo directo más largo del mundo, un viaje de Auckland a Dubái que durará 17 horas y 15 minutos. Ya es posible que vehículos de transporte reutilizables alcancen las estrellas y, dentro de un siglo iremos más allá de las estrellas, espero. Probablemente, el cambio más significativo y más previsible es que viviremos más tiempo. Varios científicos creen que la mayoría de los humanos vivirá un siglo o más, los hay incluso que vaticinan que ya ha nacido el niño que cumplirá los 150 años. Ha nacido un niño que vivirá hasta 2166. ¿Qué verá? La explicación a esta longevidad es que el humano tendrá algo de máquina y la máquina algo de humano. Robocop ya está aquí, con prótesis hidráulicas conectadas a nuestras ondas cerebrales y capacidad para crear el humano biónico. De igual modo, el cibernético llegará antes de que pasen treinta y cinco años, según un reconocido futurólogo. Si a esta ya sugerente gama de posibilidades, se suman otras fórmulas para prolongar la vida, como los





nanorrobots, o la posibilidad de dejar nuestra memoria humana en la red después de morir, el mundo será un lugar de magia hecha realidad.

Tenemos coches inteligentes, hogares inteligentes, sistemas inteligentes y vidas inteligentes. Pensemos en ese diseño de ventana que se convierte en balcón y veremos que el futuro ya está aquí.

Coches sin conductor, biotecnologías, redes inteligentes y tantas cosas más trasladarán las fantasías de *Minority Report* y *Star Trek* a un mundo de ciencia que tiene poco de ficción y mucho de realidad. Incluso se podría monitorizar la actividad cerebral y alertar a expertos sanitarios o a los servicios de seguridad antes de que se produzca una agresión, como en la antiutopía de Philip K Dick, *El informe de la minoría*.

Así pues, en esta quinta edad del hombre, en la que hombre y máquina crean superhumanos, ¿cuál sería el sistema de intercambio de valor? No será el dinero y probablemente tampoco las transacciones de datos, sino que habrá otra estructura. He aludido a ella muchas veces, porque está bastante claro que en el futuro el dinero desaparecerá. No hemos visto nunca a Luke Skywalker o al capitán Kirk pagar nada en el futuro. Eso es porque el dinero habrá perdido su significado.

En la quinta edad del hombre, el sistema monetario carecerá de sentido. Tras haber digitalizado el dinero en la cuarta edad, la estructura pasará a un sistema universal de abonos y adeudos. Dígitos en la red que registran nuestros gastos e ingresos, nuestra vida y nuestras ganancias, nuestro trabajo y nuestro placer.

Cuando los robots hayan pasado a encargarse de muchos de los trabajos y el hombre colonice el espacio, ¿seguirá centrado en la gestión de la riqueza y la creación de valor o habrá pasado a preocuparse de asuntos más filantrópicos? Este es el sueño de Gene Roddenberry y otros visionarios del espacio, y puede que acabe haciéndose realidad. Después de todo, cuando eres multimillonario, tu riqueza pierde sentido. Por eso Bill Gates, Warren Buffett y Mark Zuckerberg empiezan a interesarse por estructuras filantrópicas, una vez que el dinero y la riqueza ya no significan nada para ellos.

Por tanto, en la quinta edad del hombre —de un hombre que llevará siglos viviendo en el espacio—, ¿nos olvidaremos de los bancos, el dinero y la riqueza, y nos dedicaremos al bien del planeta y de la humanidad en general? Si todos estamos en la red y todos tenemos voz, y una sola voz puede tener la fuerza de muchas, ¿de verdad lograremos algún día ir más allá del interés propio? No tengo ni idea, pero la pregunta suscita interesantes cuestiones acerca de cómo y qué nos parecerá importante una vez que las tecnologías de prolongación de la vida y la bioingeniería nos hayan convertido en superhumanos. Cuando hayamos abandonado la Tierra por otros planetas. Y cuando alcancemos un estado en que todas nuestras necesidades físicas y mentales puedan ser satisfechas por un robot.



**Secuenciación
completa del genoma.
Esfuerzos a gran
escala**

STEVEN MONROE LIPKIN

Imagen de apertura:
Michael Mapes
Specimen No. 41 (detalle) (2007)
Impresiones fotográficas, material impreso
variado, alfileres entomológicos, cartón
pluma, tubos de ensayo, lupas, cápsulas
de gelatina, placa de Petri, pelo, bolsas de
plástico, hilo de algodón, gomas
elásticas, resina y arcilla de modelar
48 x 64 x 8 cm



Steven Monroe Lipkin

Weill Cornell Medical College, Cornell University, Nueva York, EEUU

Steven Monroe Lipkin es titular de la cátedra de medicina Gladys and Roland Harriman y director de la Adult and Cancer Genetics Clinic en la Facultad de Medicina de Weill Cornell y en el New York Presbyterian Hospital de Nueva York. Es médico-científico y compagina el tratamiento de pacientes con el estudio de aquellos genes que aumentan el riesgo de distintos cánceres y enfermedades autoinmunes. Es miembro del American College of Medical Genetics y de la American Society of Clinical Investigation.

La secuenciación completa del genoma es hoy una herramienta generalizada para diagnosticar enfermedades raras y tratar el cáncer. Con la disminución de sus costes aumenta el número de personas que se pueden beneficiar de ella. Incluso en individuos sin historial familiar claro de una enfermedad, el cribado de 76 genes —que, según consenso de los expertos, influyen en el manejo clínico global— revelará que uno de cada veinte resultará ser portador de una mutación de un gen que tendrá consecuencias en su atención sanitaria. A quienes decidan solicitar un diagnóstico genético, no obstante, tal vez les interese contratar previamente seguros de vida, discapacidad y atención sanitaria a largo plazo y reducir así sus pólizas.

A la edad de veintisiete años, Ansel K. era un joven feliz, saludable y de éxito que vivía y trabajaba en Manhattan en una firma financiera que proporcionaba apoyo administrativo y operacional a fondos de inversión tradicionales y alternativos. Lleno de energía, era monologuista cómico aficionado y miembro de una compañía de improvisación teatral que actuaba en un club nocturno de Hell's Kitchen. Ansel K. salía con una chica y estaba considerando la posibilidad de sentar cabeza, casarse y formar una familia en el plazo de unos pocos años. Igual que otros jóvenes con buena salud y en la veintena que se dedican a disfrutar de la vida, Ansel K. no iba a menudo al médico. De hecho, no tenía asignado un médico de familia y yo fui el primer profesional al que acudía en cerca de seis años.

«¿Voy a necesitar un tratamiento que cueste 400.000 dólares al año durante el resto de mi vida y voy a perder mi seguro médico?» fue lo primero que me preguntó Ansel K. Paulson un día lluvioso durante su primera visita al servicio de Genética en Adultos del Weill Cornell Medicine and New York Presbyterian Hospital de Nueva York.

La familia de Ansel también gozaba en general de buena salud y, por fortuna para él, no tenía un historial de problemas médicos graves. Sin embargo, varios meses antes, la madre de Ansel, aficionada a leer *Scientific American*, las secciones de ciencia del *Times* y del *New York Times* y a la serie del canal de televisión Nova dedicada a los nuevos y emocionantes descubrimientos en medicina genética, e intrigada por la genealogía genética de su familia, solicitó por correo un test de ADN de 199 dólares a la compañía 23andMe con una muestra de su saliva.

De las cerca de tres mil millones de bases de ADN que tiene el genoma de una persona, 23andMe analiza una selección escogida de alrededor de un millón, asociada a información





diversa sobre la ascendencia de un individuo, hasta que la Food and Drug Administration de Estados Unidos limitó las pruebas hace varios años a variantes genéticas ligadas a un amplio espectro de enfermedades genéticas. 23andMe ha examinado el ADN de más de un millón de personas y en la actualidad tiene contratos de colaboración con laboratorios, como Roche, Genentech y Pfizer, con el fin de identificar objetivos farmacológicos para enfermedades genéticas nuevas.

Los resultados del test de la madre de Ansel revelaron que era portadora de una mutación genética que había sido previamente identificada en docenas de personas antes de causar una dolencia bien documentada y preocupante para la que existen varias terapias efectivas (aunque costosas): la enfermedad de Gaucher. La enfermedad de Gaucher está causada por mutaciones en el gen GBA. Los portadores de la mutación de la enfermedad de Gaucher sufren una acumulación de un tipo particular de residuo de molécula grasa cuyo nombre científico es glucosilceramida.

En los pacientes con síndrome de Gaucher, el bazo puede hincharse hasta multiplicar por diez su volumen normal. Dependiendo del paciente y de la mutación particulares, la enfermedad de Gaucher también puede causar agrandamiento del hígado, anemia, el cáncer de sangre mieloma múltiple y la enfermedad degenerativa de Parkinson, entre otras dolencias. La madre de Ansel vivía ajena a todo esto. Se acercaba a los sesenta años, pero no había tenido problemas médicos que se pudieran asociar claramente a su enfermedad, aunque otros portadores del síndrome de Gaucher con la misma mutación sí lo hacen, y desarrollan trastornos muy graves. La enfermedad de Gaucher se trata con fármacos que reemplazan la proteína producida por el gen GBA defectuoso y que en Estados Unidos pueden costar más de 400.000 dólares al año. No obstante, cosa curiosa, ni la madre de Ansel ni él parecían tener síntomas ni de la enfermedad de Gaucher ni de sus secuelas.

En parte, esta curiosa situación refleja un escenario común a la mayoría de enfermedades genéticas. Cuando se identifican por primera vez, los investigadores se centran en estudiar a los pacientes más gravemente afectados con el fin de asegurarse de que han definido de manera correcta los síntomas asociados a un gen particular. Luego, con el tiempo, a medida que se hacen pruebas a más pacientes en busca de mutaciones del gen, resulta (sucede muy a menudo) que algunos pueden tener la mutación del gen, pero síntomas menos severos, o incluso ninguno en absoluto. En general, para la mayoría de trastornos genéticos, portar una mutación particular aumenta estadísticamente el riesgo de desarrollar la enfermedad, pero no significa que una persona esté destinada a padecerla o a morir por su causa. Hay más factores en juego.

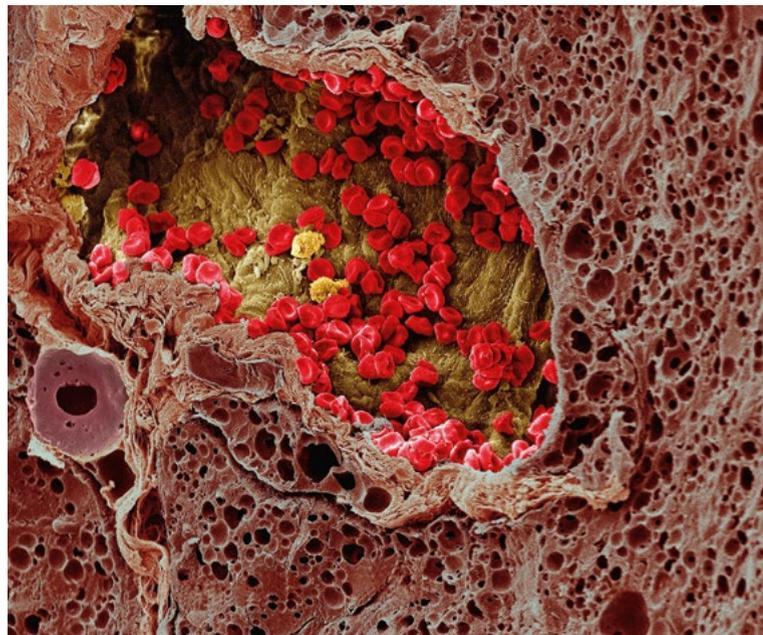
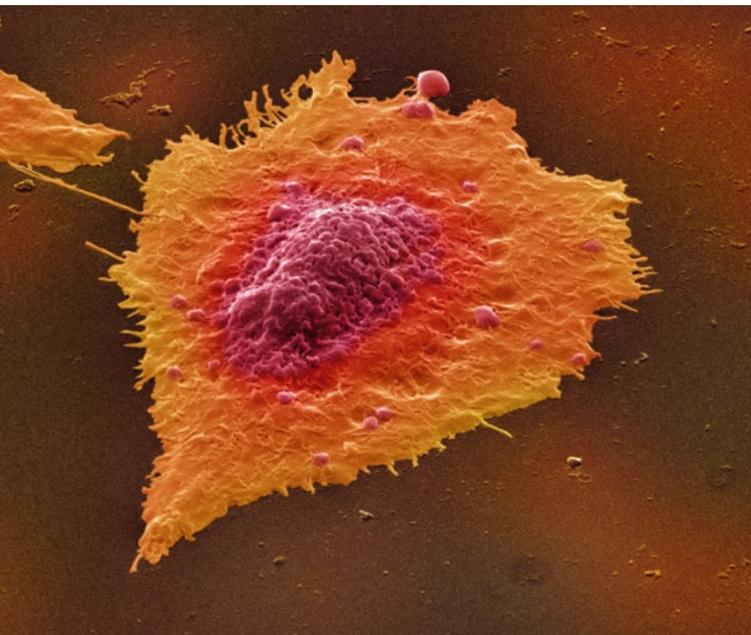
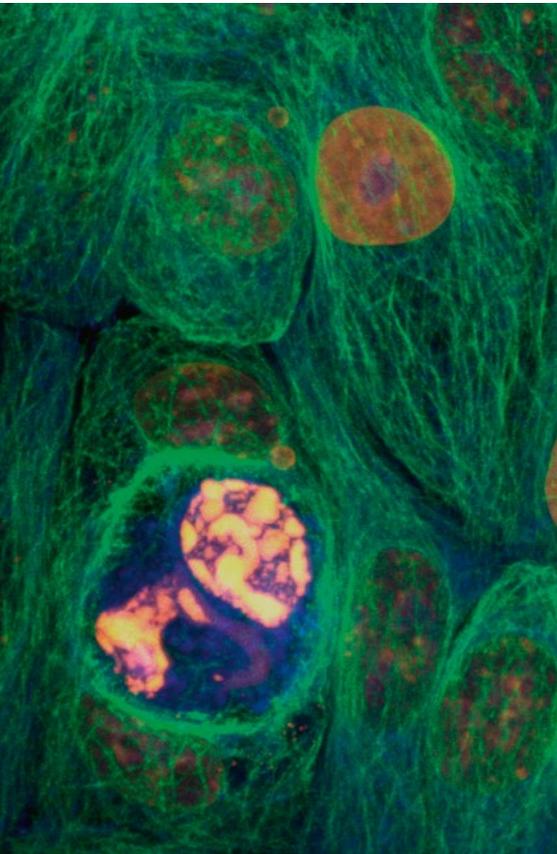
¿Cómo es posible? En 1624, antes de que supiéramos de la existencia del ADN o los genes, el poeta John Donne escribió: «Ningún hombre es una isla». Esto es cierto a menudo en los genes y en las mutaciones genéticas, y constituye la razón de que hoy estemos entrando en la era de la genómica de poblaciones. Existe un gran número de factores que puede influir a la hora de que una mutación genética, de hecho, provoque que un individuo desarrolle una enfermedad lo bastante grave como para privarlo de la dicha de estar sano y trasladarlo al sistema médico en calidad de paciente diagnosticado. Estos factores reciben a menudo el nombre de modificadores de enfermedad. Los modificadores de enfermedad pueden ser ambientales (por ejemplo, la cantidad de azúcar en la dieta de individuos con predisposición a la diabetes o el grado de ejercicio diario que influye en el peso) o incluir variantes en genes que modifican el impacto de otros genes, en lo que se llama «interacción entre genes».

Así, por ejemplo, es posible que la familia de Ansel K. sea portadora de otras mutaciones genéticas que mitiguen los síntomas de la enfermedad de Gaucher en personas con su mutación GBA particular, y que podrían, en principio, conducir a nuevos objetivos farmacológicos para tratar la enfermedad que fueran mejores que la medicación existente (y costosa). Aunque sabemos que existen muchos modificadores de enfermedad, lo crucial aquí es si hay, para un desorden determinado, modificadores individuales que tengan un efecto amplio y sean potencialmente utilizables por parte del médico encargado de tratar al paciente.

El número de variables que pueden modificar las mutaciones genéticas es extremadamente alto, puesto que los modificadores genéticos pueden llegar a ser millones. La combinación del rápido abaratamiento de los costes de secuenciar el ADN, el interés por determinar qué enfermedades tienen un componente genético, los fuertes incentivos que existen para identificar y desarrollar nuevos objetivos farmacológicos y también los modificadores genéticos y ambientales de enfermedades ha impulsado esfuerzos en Europa, Estados Unidos y Asia para secuenciar el genoma completo de miles, si no millones, de personas. Esta acción ha adoptado diversas formas.

Son muchos los que preguntan por qué necesitamos secuenciar tanto ADN. ¿No tenemos ya una buena comprensión de la genética de los seres humanos? Una de las grandes sorpresas del Proyecto Genoma Humano, que completó el primer genoma humano en 2002, fue la revelación de que tenemos solo unos 20.000 genes, la misma cantidad que el gusano de la harina, la mosca de la fruta o un ratón. Es el prototipo básico de la vida. Lo significativo son las diferencias genéticas existentes entre especies diversas de animales, y por ello la atención se concentra ahora en las disparidades genéticas entre individuos.





De izquierda a derecha: células de cáncer de pecho, células HeLa, células de cáncer de colon y vasos sanguíneos en un melanoma

Hoy sabemos que para comprender el papel que desempeñan las mutaciones individuales debemos entender su contexto. Esto pasa por identificar otras variantes genéticas heredadas con una mutación y, lo que es igual de importante, por encontrarle sentido a toda esa información conociendo el máximo posible de detalles del historial médico y también aparentemente no médico de la persona portadora de esas mutaciones. La información específica necesaria para una anotación detallada del genoma incluye los síntomas, a qué edad empezaron y otros datos como presión sanguínea, estatura y peso, historial de enfermedades, medicación, vacunas, etcétera.

Encontrar las causas específicas de enfermedades genéticas y lo que modifica su impacto a la hora de mantener a una persona sana o enferma tiene consecuencias significativas. Sobre todo, en términos de salud pública, esta información puede permitirnos prevenir enfermedades, o al menos detectarlas pronto para así reducir la enorme carga de sufrimiento humano que provocan. También es importante el hecho de que el estudio de todos estos genomas y la información que llevan asociada sobre las vidas de estos pacientes revele nuevos objetivos, de manera que la industria farmacológica desarrolle medicamentos para prevenir enfermedades y mantener a los seres humanos sanos más tiempo a edades avanzadas. Esto último tiene un notable valor comercial, así como científico y médico, y en parte ha impulsado varios esfuerzos nacionales por secuenciar los genomas de cientos de miles, e incluso millones, de personas. Así, existe una competencia por identificar modificadores de genes y combinaciones de mutaciones genéticas que causan enfermedades secuenciando a millones de personas con el fin de encontrar las combinaciones que servirán de cimientos para la medicina del próximo siglo.

En la actualidad, el proyecto más avanzado en este sentido está en el Reino Unido. En parte inspirado por los Juegos Olímpicos de 2012 en Londres, que llamaron la atención del primer ministro David Cameron sobre las grandes hazañas atléticas que pueden conseguir individuos excepcionales dotados de los rasgos genéticos adecuados y un fuerte deseo por sobresalir y competir, se puso en marcha el proyecto 100.000 Genomas. Se creó una compañía, Genomics England.

Genomics England es propiedad del Servicio de Salud del Reino Unido y ha sido fundada en su totalidad por él con el objetivo de secuenciar 100.000 genomas completos de los pacientes de su sistema público de salud antes de que termine 2017. Sus metas primordiales son beneficiar a pacientes, crear una infraestructura de medicina genómica para el servicio de salud pública, facilitar nuevos descubrimientos científicos y médicos y acelerar el desarrollo de la industria genómica en el Reino Unido.

Los pacientes donan muestras y proporcionan información médica y sobre su estilo de vida después de firmar un consentimiento que autoriza el uso de su ADN y de sus datos. Son formularios de consentimiento más amplios pero similares a los usados antes de que a un paciente se le realice una operación o reciba quimioterapia para un cáncer. Otro ejemplo sería, quizá, el consentimiento que firman los usuarios de Facebook o el sistema operativo del iPhone de Apple y que permite a estas compañías usar los datos que cada individuo recoge en sus cuentas y beneficiarse de ellos enviándoles publicidad personalizada, o vender datos agregados de clientes a compañías de *marketing*. En general, la gran mayoría de individuos considera que los beneficios de usar estos servicios, a menudo proporcionados a un coste muy pequeño o inexistente, exceden con mucho los riesgos que entraña perder el control de su privacidad.



Estos consentimientos informados han sido aprobados por un comité ético independiente del Servicio Nacional de Salud del Reino Unido. El consentimiento incluye estadísticas que preguntan explícitamente si los pacientes autorizan que compañías comerciales lleven a cabo investigaciones aprobadas usando sus genomas y sus datos. Muchos pacientes, de hecho, están deseosos de que sus datos genéticos, médicos y de estilo de vida se utilicen para impulsar la investigación sobre las condiciones específicas que les afectan, en lo que constituye una modalidad ya establecida de colaboración abierta o *crowdsourcing*.

Genomics England también cobrará por sus servicios de datos de manera que los costes de su mantenimiento sean razonablemente bajos. Estos servicios los usan compañías farmacéuticas, pero también investigadores académicos y médicos de Estados Unidos y de Europa. Así, por ejemplo, un individuo en Alemania con una mutación genética particular, o su médico, tendrían que pagar por acceder a datos relativos a los síntomas y la tasa de incidencia de otros individuos portadores de la misma «una entre un millón» variante genética. Actualmente, aún falta perfilar los detalles.

Impulsadas por el mismo objetivo que Genomics England, existen otras iniciativas de envergadura para secuenciar el genoma de muchos ciudadanos. Estas incluyen colaboraciones como las que existen entre la organización estadounidense de salud Geisinger Health System, de Pensilvania, con la Regeneron Pharmaceutical Corporation para secuenciar los exomas (el ~15% del genoma que codifica todo el ADN convertido en proteínas y la parte del genoma humano que se considera más importante para la enfermedad) de entre 50.000 y 100.000 voluntarios. Otro proyecto es el de la empresa privada Human Longevity Sciences, fundada por Craig Venter —quien ya en 2003 había secuenciado comercialmente una gran porción del genoma humano original—, para secuenciar 100.000 o más pacientes de la Universidad de California, del servicio de salud de San Diego, de organizaciones sanitarias de Sudáfrica y de participantes de ensayos clínicos dirigidos por Roche y AstraZeneca. En China, Alemania, Holanda, Israel, Arabia Saudí, Estonia y Qatar hay iniciativas de gran escala similares en las que participan entre decenas y cientos de miles de personas.

El actual líder, Genomics England, incluye tanto adultos como niños, pero está más centrado en enfermedades de la edad adulta. En 2012, los National Institutes of Health de Estados Unidos pusieron en marcha un esperanzador programa piloto dotado con 25 millones de dólares para secuenciar los genomas de cientos de bebés de Estados Unidos con el objetivo de aprender más sobre la validez ética y la viabilidad clínica y de interpretación que tendría este test frente al cribado neonatal para desórdenes genéticos como la galactosemia, que pueden causar retraso mental si no se detectan y se tratan a tiempo. «Imaginemos el día en el que se secuencie el genoma de todos los recién nacidos y esta información forme parte de una historia médica electrónica que podría usarse durante el resto de la vida de ese niño tanto para prevenir mejor como para estar más alerta ante manifestaciones tempranas de una enfermedad», ha declarado Alan Guttmacher, director del Instituto Nacional de Salud Infantil y Desarrollo Humano, que financió el estudio. Esta iniciativa articula la voluntad de alterar el equilibrio actual entre tratamiento de la enfermedad, detección temprana y prevención para poner el énfasis en los dos últimos elementos. En prácticamente todas las enfermedades genéticas, los pacientes evolucionan mejor cuando sus síntomas se detectan de manera temprana y se tratan con agresividad.



En el caso de la infancia, las enfermedades recesivas son particularmente importantes. Tenemos dos ojos, dos oídos, dos riñones, etcétera, como sistema de seguridad en caso de que uno funcione mal. Lo mismo ocurre con muchos genes. Portamos dos ejemplares de cada cromosoma (excepto los cromosomas X e Y). Para la mayoría de los genes, si un ejemplar muta, el otro toma el relevo y no hay secuelas médicas. En las enfermedades recesivas, en las que cada progenitor es portador de un gen mutado, un niño hereda por casualidad los dos ejemplares mutados del mismo gen y, en consecuencia, no tiene un sistema de seguridad en forma de gen intacto no mutado. Existen alrededor de 4.000 enfermedades genéticas recesivas con incidencia baja, pero que, sumadas, afectan a cerca del 2% de la población. Un argumento fundamental a favor de testar el genoma completo de cada recién nacido es que, aunque la mayoría de las enfermedades recesivas tienen una tasa de incidencia individual rara, el dolor y sufrimiento que ocasionan recae de manera desproporcionada en los miembros de la sociedad más valiosos y vulnerables: los niños. Además, los beneficios de tratar y curar una enfermedad infantil son vitales.

La MCAD es una de las enfermedades para las que se hace cribado a los recién nacidos mediante análisis bioquímicos de gotas de sangre extraídas del talón a los pocos días de vida. Este trastorno afecta aproximadamente a uno de cada 10.000 recién nacidos. Sin embargo, no se realizan pruebas genéticas a los padres porque es una enfermedad demasiado rara como para justificar los costes de hacer análisis a todo el mundo.

Anne Morris, colega del mundo de la genética y amiga, es una madre cuya familia resultó alcanzada por el rayo genético y que podría haberse beneficiado de unos test genéticos más universales antes de la concepción de un niño. Anne es una del 1-2% de mujeres en Estados Unidos y Europa que ha tenido que recurrir a la fertilización in vitro para tener hijos. El suyo fue concebido con sus óvulos y un donante de esperma. Los bancos de esperma hacen cribado de sus donantes en busca de las enfermedades genéticas más comunes, como la fibrosis quística, pero no de enfermedades recesivas raras, de nuevo debido a los costes.

Tanto el hijo de Anne como su padre biológico eran portadores de una mutación del gen ACADM que causa una deficiencia de acil-CoA deshidrogenasa de cadena media de la enfermedad recesiva, o MCAD. El ACADM es un gen metabólico que ayuda a convertir grasas en azúcar para proporcionar energía al cuerpo. Los recién nacidos desarrollan hipoglucemia, a menudo después de periodos de contraer infecciones y de no beber leche materna o





«Diez dedos en las manos y diez dedos en los pies, eso era lo único que importaba antes. Ya no. Ahora, a los pocos segundos de vida ya se podía saber el tiempo exacto y la causa de mi muerte.»

ANDREW NICCOL
Director y guionista de *Gattaca* (1997)



Gattaca (1997), Andrew Niccol

maternizada en cantidades suficientes. Cuando no se diagnostica, la MCAD es una causa considerable de muerte súbita del lactante o de convulsiones después de una enfermedad leve. Sin embargo, la dieta y el estrés son importantes modificadores de la enfermedad. En consecuencia, los niños con MCAD pueden pasar largos periodos de tiempo asintomáticos hasta que una enfermedad u otras fuentes de estrés les hacen dejar de comer y sus niveles de azúcar bajan demasiado. Los niños con MCAD pueden llevar una vida larga y plena cuando se les diagnostica y son objeto de un seguimiento cuidadoso por parte de su familia y de profesionales de la medicina que vigilen su dieta, detecten los síntomas a tiempo y les empiecen a administrar medicamentos.

Anne quedó tan admirada de los beneficios del diagnóstico genético que puso en marcha GenePeeks, una compañía de testado genético en Nueva York y Massachusetts centrada en análisis genético exhaustivo de alta calidad para más de 600 enfermedades pediátricas a costes razonables para los futuros padres.

El estudio «genoma bebé» sigue en marcha, pero después de resultados preliminares satisfactorios se ha expandido a un grupo de población estadounidense más grande con el Programa de Cohorte para la Iniciativa sobre Medicina de Precisión. El presidente Obama, en su discurso sobre el estado de la Unión del 20 de enero de 2015, hizo público su apoyo a esta iniciativa. El objetivo del Programa de Cohorte para la Iniciativa sobre Medicina de Precisión es «acercarnos a la cura de enfermedades como cáncer y diabetes, y darnos acceso a todos a la información personalizada que necesitamos para preservar nuestra salud y la de nuestras familias». Similar a Genomics England, el Programa de Cohorte para la Iniciativa sobre Medicina de Precisión elaborará un gran grupo de población de estudio de un millón o más de estadounidenses. Puesto que la población de Estados Unidos es étnicamente más diversa que la del Reino Unido, uno de sus objetivos importantes es incluir a minorías menos estudiadas, como afroamericanos, hispanos e indígenas americanos. Otros objetivos oficiales incluyen desarrollar cálculos cuantitativos de riesgo de un espectro de enfermedades integrando peligros ambientales, mutaciones genéticas e interacciones gen-medioambiente; identificación de los factores determinantes de la variación de un individuo a otro en términos de eficacia y seguridad de las terapias más extendidas y el descubrimiento de biomarcadores que identifiquen a aquellas personas con riesgo mayor o menor de desarrollar enfermedades comunes. Además, se intensificará el uso de tecnologías de la salud móviles en el iPhone y dispositivos similares para recopilar grandes cantidades de datos sobre actividad física, localización de pacientes en distintos entornos (por ejemplo, rural frente a urbano), medidas fisiológicas y riesgos ambientales con efectos sobre la salud; desarrollo de sistemas de clasificación y de interacción para las nuevas enfermedades; empoderamiento de los participantes con información útil para mejorar su salud y la creación de una plataforma para identificar pacientes con los que realizar ensayos clínicos de las nuevas terapias. El Programa de Cohorte para la Iniciativa sobre Medicina de Precisión empieza a reclutar pacientes de todas las regiones geográficas de Estados Unidos en noviembre de 2016.

Existe un gran potencial de beneficios para la sociedad en estos estudios genómicos de la población. Permitirán detectar enfermedades importantes en los pacientes antes de que aparezcan los síntomas o se produzcan consecuencias catastróficas, como ruptura de vasos sanguíneos en personas con enfermedades de tejido conectivo. Se desarrollarán nuevas pruebas diagnósticas y medicamentos para tratar trastornos genéticos antes no





diagnosticados a partir de un defecto biológico de base subyacente específico y no de complicaciones posteriores no específicas. Hay motivos para confiar en que un conocimiento mejor de la genética también reducirá los costes de atención sanitaria y permitirá el uso de terapias de precisión en lugar de los tratamientos «de talla única» que son hoy la norma.

Sin embargo, hay causas potenciales de preocupación para los individuos que participan en estudios genómicos de población. Si bien las condiciones específicas dependen de la nacionalidad de cada uno, los pacientes de Europa y Estados Unidos a menudo se preguntan si la secuenciación de su genoma cambiará las pólizas que pagan por su seguro médico.

En el Reino Unido la sanidad es universal y los pacientes no pagan a no ser que busquen un tratamiento privado con servicios más exclusivos y tiempos de espera menores. En Estados Unidos, sin embargo, la cobertura sanitaria no es universal y las personas deben contratar un seguro específico. Además hay otros tipos de seguro a los que puede afectar esta situación. En el Reino Unido, Estados Unidos y muchos países de Europa, estos incluyen seguros de vida, seguro contra enfermedad grave (en Estados Unidos a menudo llamado atención sanitaria a largo plazo) o seguro de invalidez.

En la mayoría de los casos, para estas personas que participan en Genomics England, 100.000 Genomics Project o Iniciativa para la Medicina de Precisión, la secuenciación de sus genomas no influirá en sus pólizas de seguros médicos (en Estados Unidos), de vida, de enfermedad y de invalidez (en Estados Unidos, Reino Unido y muchos países de la Unión Europea), porque es un estudio de investigación y no se requiere a los pacientes que comuniquen a sus compañías aseguradoras que tienen resultados de pruebas genéticas.

Pero incluso en personas sanas sin historial evidente personal o familiar que sugiera una enfermedad genética (como Ansel K.), más del 4,5% (y cuando se hayan secuenciado todos los genomas el porcentaje seguramente aumentará) tendrá una mutación genética preocupante que influirá de manera directa en su cobertura sanitaria actual. Así, de Genomics England se calcula que entre 5.000 y 7.000 personas o más saldrán con un diagnóstico positivo, y para la Iniciativa para la Precisión Médica la cifra será de entre 50.000 y 70.000.

Aunque los pacientes que participan en 100.000 Genomes o Iniciativa para la Precisión Médica no tienen obligación de revelar los resultados de la secuenciación de su genoma, sí deberán responder con sinceridad a preguntas relativas a cribado o tratamientos preventivos. Así, por ejemplo, si una mujer resulta tener una mutación de un gen que aumenta el riesgo de cáncer colorrectal y se somete a una colonoscopia anual en busca de tumores, tendrá que comunicarlo y esto podría influir en su cobertura médica. Por supuesto, no sería descabellado que la aseguradora decidiera examinar de cerca el historial médico

personal y familiar de un individuo antes de decidir su cobertura. Esto podría ser particularmente importante en pólizas de seguros de enfermedad crónica e invalidez.

En Estados Unidos, en mayo de 2008, el presidente George W. Bush firmó la Ley de no discriminación por información genética (GINA, por sus siglas en inglés). Esta ley había sido presentada como proyecto de ley federal en el congreso nada menos que doce años antes, pero distintos comités y subcomités del Congreso la habían frenado. La ley fue aprobada por el Senado con 95 votos a favor y ninguno en contra, y en la Cámara de Representantes con 411 a favor y uno en contra. El único *no* fue del congresista Ron Paul, que es ahora mismo uno de los líderes conservadores del Partido Republicano y destinatario de sustanciosas donaciones por parte del *lobby* de compañías aseguradoras de Estados Unidos.

GINA prohíbe la discriminación genética tanto en los seguros laborales como de salud. En concreto, las aseguradoras y los empleadores con más de quince trabajadores no pueden requerir información genética para usarla en ninguna de sus decisiones. Sin embargo, las pequeñas empresas están exentas debido a los costes administrativos. The Genetic Alliance, por ejemplo, una organización sin ánimo de lucro dedicada al uso responsable de información genética, declaró que GINA era un hito en la historia de la genética en Estados Unidos y los derechos civiles. No obstante, GINA tiene algunas limitaciones. No protege de discriminaciones en la contratación de seguros de vida y de enfermedad, algo similar a lo que ocurre en el Reino Unido.



La situación se complica porque en cada estado puede haber leyes que proporcionen protección adicional por encima y más allá de la contemplada por la ley GINA. Para personas que están considerando participar en la Iniciativa para la Medicina de Precisión, la Junta para la Responsabilidad Genética, que proporciona información sobre protección y leyes específicas de cada estado, es un recurso de utilidad. Por ejemplo, en el estado de California existe una ley llamada Cal-GINA que proporciona protección legal civil frente a la discriminación genética en la contratación de seguros de vida, de enfermedad e incapacidad, así como en cobertura sanitaria, empleo, vivienda, educación, préstamos hipotecarios y

elecciones. Los estados de Vermont, apoyado por el candidato demócrata Bernie Sanders, y Oregón también tienen una legislación estricta que prohíbe ampliamente el uso de diagnósticos genéticos en la contratación de seguros de enfermedad, vida y discapacidad. Sin embargo, en la mayoría de estados, la única cobertura existente es la que provee GINA; es el caso de Nueva York, donde yo practico la medicina.

No es una situación teórica, sino de la vida real, y tengo pacientes a los que se les ha denegado un seguro de vida por un diagnóstico genético. Por ejemplo, Karen Young es una paciente de mi consulta con síndrome de Lynch, una enfermedad de predisposición genética al cáncer que aumenta el riesgo de cáncer colorrectal, uterino, ovárico y de otras clases, y está causada por mutaciones en el MSH2, el MLH1 y otros genes. Karen está en la década de los cincuenta y se le han extirpado quirúrgicamente el colón, el útero y los ovarios. Nunca ha tenido cáncer y es rigurosa con las pruebas, pues quiere mantenerse sana para poder trabajar y hacerse cargo de su familia. A pesar de su meticulosidad, a Karen le denegaron un seguro de vida con argumentos poco convincentes que aludían a su diagnóstico genético. La carta de rechazo de su aseguradora decía:

Como todas las compañías aseguradoras, tenemos unas directrices que determinan cuándo se puede o no proporcionar cobertura. Por desgracia, tras considerar atentamente su solicitud, lamentamos informarle de que no podemos proporcionarle cobertura debido a que ha dado positivo en la mutación del gen MSH2, que causa el síndrome de Lynch, tal y como figura en su historial médico.

Si ha recibido otras cartas anteriores a esta que ha interpretado como cobertura, por favor, ignórelas. No tiene usted cobertura. Además, en caso de tener una póliza previa, por favor siga abonándola.

En resumen, las preocupaciones de pacientes como Karen o Ansel empiezan a hacerse oír ahora. Los programas (públicos y privados) a gran escala de investigación genómica de población en el Reino Unido, Estados Unidos y otros países tienen un gran potencial para mejorar nuestra capacidad de diagnosticar y, con el tiempo, desarrollar tratamientos nuevos y efectivos para muchos individuos con un amplio espectro de enfermedades. Puesto que los costes de secuenciación del ADN se han reducido drásticamente, el número de personas que podrían beneficiarse de la secuenciación completa del genoma tiene la posibilidad de crecer también drásticamente.

Lo que sí se demora demasiado, sin embargo, es una legislación que proteja a los ciudadanos estadounidenses de las preocupaciones relativas a los seguros y a la discriminación genética, abierta o encubierta. Debido a la velocidad con que progresan estos ambiciosos proyectos de investigación, Estados Unidos, Reino Unido y otros países con programas similares necesitan con urgencia una protección legal más exhaustiva para las personas con su genoma secuenciado. No estamos en situación de decir «Aquí no puede pasar», porque la discriminación genética es ya un hecho en todo el mundo. A no ser que se introduzcan salvaguardas legales más exhaustivas, existe el riesgo de una reacción pública negativa que limite la voluntad de los individuos a participar en estas importantes empresas científicas en detrimento de toda la población de nuestros países.





Ingeniería humana para frenar el cambio climático

S. MATTHEW LIAO

Imagen de apertura:
Departamento de Agua y Energía (DWP)
de la central hidroeléctrica de San
Fernando, Sun Valley, California, EEUU



S. Matthew Liao

Center for Bioethics | New York University, Nueva York, EEUU

S. Matthew Liao es titular de la cátedra de Bioética Arthur Zitrin, director del Center for Bioethics y profesor asociado de Filosofía de la New York University. Es autor de *The Right to Be Loved* (Oxford University Press, 2015), *Philosophical Foundations of Human Rights* (Oxford University Press, 2015) y *Moral Brains: The Neuroscience of Morality* (Oxford University Press, 2016). Ha dado charlas TED en Nueva York y Ginebra y ha sido entrevistado por *The New York Times*, *The Atlantic*, *The Guardian*, *Harper's Magazine*, *Sydney Morning Herald*, *Scientific American*, *Newsweek* y otros medios.

El cambio climático provocado por el hombre es uno de los mayores problemas a los que nos enfrentamos. Por desgracia, las soluciones existentes de tipo conductual y de mercado parecen insuficientes para mitigar los efectos del cambio climático, y la geoingeniería podría tener consecuencias catastróficas para nosotros y para el planeta. En este artículo propongo explorar un nuevo tipo de solución al cambio climático que llamo «ingeniería humana», y que incluye modificaciones biomédicas de los humanos de modo que puedan mitigar y adaptarse al cambio climático. Argumentaré que la ingeniería humana entraña menos riesgos potenciales que la geoingeniería, y que podría contribuir al éxito de las soluciones conductuales y de mercado.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático de origen humano es uno de los mayores problemas a los que nos enfrentamos en la actualidad. Millones de personas podrían sufrir hambrunas, escasez de agua, enfermedades e inundaciones costeras por su causa (IPCC 2007). La ciencia contemporánea nos indica que podemos estar cerca o incluso más allá del punto de no retorno.¹ Las consecuencias más graves del cambio climático podrían atenuarse si conseguimos reducir y estabilizar los niveles de gases de efecto invernadero en la atmósfera. Para ello se han propuesto diferentes soluciones, que van desde las conductuales de baja tecnología o *low-tech*, como aconsejar a las personas que usen menos los vehículos y reciclen más; soluciones de mercado, como gravar con impuestos el carbono y el comercio de derechos de emisión o incentivar a las industrias para que adopten tecnologías energéticas, térmicas y de transporte más limpias; hasta soluciones de geoingeniería, es decir, intervenciones a gran escala en el medioambiente, que incluirían la reforestación, el rociado de la estratosfera con aerosoles de sulfato para alterar la reflectividad del planeta y la fertilización de los océanos con hierro para estimular el desarrollo de algas que ayuden a eliminar el carbono de la atmósfera (Keith 2000).

Cada una de estas soluciones tiene sus ventajas y sus inconvenientes. Por ejemplo, las conductuales son las que la mayoría de nosotros podríamos aplicar con facilidad. Por otro lado, muchas personas carecen de motivación para alterar sus costumbres de la manera requerida. Y es importante tener en cuenta que, aunque hubiera una aplicación a gran escala de las





soluciones conductuales, tal vez no bastaría para mitigar los efectos del cambio climático. Por su parte, las soluciones de mercado podrían, por un lado, amortiguar el conflicto que representa actualmente para las empresas decidir entre conseguir beneficios y minimizar su impacto medioambiental. Pero las verdaderamente eficaces, como el comercio internacional de derechos de emisión, exigen acuerdos internacionales factibles, que hasta el momento han resultado difíciles de vertebrar. Así, los datos existentes sugieren que el Protocolo de Kioto no ha logrado reducciones palpables en los niveles mundiales de emisiones (Shishlov *et al.* 2016), y ya se perciben señales de que Estados Unidos, por ejemplo, muy probablemente no podrá cumplir con los objetivos fijados en el Acuerdo de París (Greenblatt y Wei 2016). Es más, se ha estimado que para devolver nuestro clima a niveles habitables habría que recortar las emisiones globales de carbono en al menos el 70% (Washington *et al.* 2009). Dada la demanda poco flexible y creciente de petróleo y electricidad, hay serias dudas sobre si las soluciones de mercado, como la aplicación de impuestos al carbono, lograrán por sí solas una reducción de la magnitud deseada.

En consecuencia, algunos científicos y políticos proponen que nos tomemos muy en serio la idea de la geoingeniería, ya que, al menos en teoría, su impacto podría ser lo bastante importante como para mitigar el cambio climático.² Uno de los grandes problemas de la geoingeniería es que en muchos casos carecemos de los conocimientos científicos necesarios para desarrollarla e implantarla sin incurrir en graves peligros para nosotros o las generaciones futuras. De hecho, rociar aerosoles de sulfato podría destruir la capa de ozono, y la fertilización con hierro podría promover la formación de un plancton tóxico que destruyese algunas o todas las demás formas de vida marina. En este contexto, propongo que exploremos otras soluciones al cambio climático que no han sido consideradas antes y que entrañan menos riesgos potenciales que la geoingeniería. Es lo que mis colegas y yo hemos denominado, en otras publicaciones, «ingeniería humana» (Liao *et al.* 2012).

La ingeniería humana consiste en la modificación biomédica de los humanos para que mitiguemos mejor y nos adaptemos también mejor a los efectos del cambio climático. Añadiré que la ingeniería humana es, potencialmente, un medio eficaz de contrarrestar el cambio climático, sobre todo combinada con las soluciones ya descritas. Antes de explicar la propuesta quiero aclarar que la ingeniería humana está pensada como una actividad voluntaria —impulsada quizá por iniciativas como exenciones tributarias o ayudas a la asistencia sanitaria— y no obligatoria y forzosa. Estoy absolutamente en contra de toda forma de coacción como la que los nazis perpetraron en el

pasado (segregación, esterilización y genocidio). Además, la propuesta está dirigida a los que creen que el cambio climático es un problema real y, en consecuencia, defienden medidas potencialmente catastróficas como la geoingeniería. Quien no cree que el cambio climático es un problema real, seguro que considera que pedir a la gente que recicle más es una reacción exagerada. Por último, la principal reivindicación aquí es muy modesta, solo queremos que la ingeniería humana sea tenida en cuenta junto a otras soluciones, como la geoingeniería. No esperamos que se convierta en medida gubernamental. Es un intento de abordar con enfoques «originales» un problema aparentemente sin solución.

Veamos cuatro ejemplos de ingeniería humana que: a) parecen realistas y factibles de implantar en un futuro próximo y b) parecen deseables incluso para quienes no les preocupe el cambio climático. Los ejemplos que propongo no son los únicos posibles y por eso invito a los lectores a que aporten mejores ejemplos que ilustren la idea de que hay que tomarse en serio la ingeniería humana.

INTOLERANCIA FARMACOLÓGICA A LA CARNE

Un informe muy citado de la FAO calcula que el 18% de las emisiones de efecto invernadero del mundo (medidas en CO₂) proceden de las granjas de ganadería intensiva, un porcentaje superior al del transporte. Otros han sugerido que la ganadería supone al menos el 51% del total de emisiones de gases de efecto invernadero en el mundo (Goodland y Anhang 2009). Incluso hay cálculos que dicen que las emisiones de óxido nitroso y de metano actualmente producidas por la ganadería podrían duplicarse en 2070 (Hedenus *et al.* 2014). Este dato bastaría para que no se pudieran cumplir los objetivos marcados para frenar el cambio climático. Sin embargo, incluso según los cálculos más conservadores, cerca del 9% de las emisiones humanas de CO₂ se deben a la deforestación para ampliar zonas de pasto, el 65% de las de óxido nitroso antropogénico al estiércol y el 37% por ciento del metano antropogénico procede directa o indirectamente del ganado. Algunos expertos estiman que cada una de los 1.500 millones de vacas que hay en el mundo emite por sí sola de 100 a 500 litros de metano al día (Johnson y Johnson 1995). Como una gran proporción de estas vacas y de otro ganado está destinada al consumo, reducir la cantidad de estas carnes rojas en nuestra dieta podría tener efectos importantes sobre el medio ambiente (Eshel y Martin 2006). De hecho, incluso una





pequeña reducción (21% al 24%) en el consumo de carne roja tendría como resultado la misma reducción de emisiones que la localización total de la producción de alimentos, es decir, cero «*food miles*» (Weber y Matthews 2008).

Hay personas que no van a desistir de comer carne roja. Hay otras que sí podrían, pero carecen de la motivación o la voluntad necesarias. Después de todo, muchos encuentran irresistible el sabor de la carne roja. Esto puede explicar por qué muchos restaurantes vegetarianos sirven platos elaborados con plantas que saben a carne.

Aquí es donde la ingeniería humana podría ser de ayuda. Al igual que hay personas con intolerancia natural, por ejemplo a la leche o a la langosta, podríamos inducir artificialmente una ligera intolerancia a la carne roja. Aunque en principio la intolerancia a la carne no es muy común, podría inducirse estimulando el sistema inmunológico contra las proteínas comunes en la carne de vacuno (Fuentes *et al.* 2005). Así el sistema inmune estaría preparado para reaccionar ante ellas y desde ese momento los alimentos «no ecológicos» producirían sensaciones desagradables a quien los come. Incluso aunque los efectos no duren toda la vida, es posible que el aprendizaje perdure.

De hecho, existen pruebas de que la intolerancia a la carne se puede provocar de forma natural. Las picaduras de la garrapata Lone Star pueden producir alergia a la carne roja.³ Esta garrapata inyecta un carbohidrato llamado alfa-gal que está presente en la carne roja, pero no en los humanos. Por lo general, la presencia de alfa-gal en la carne no es perjudicial para los humanos. Pero cuando una garrapata Lone Star pica a una persona, le transfiere su alfa-gal al torrente sanguíneo. En consecuencia, el organismo de esa persona produce anticuerpos para combatir el carbohidrato. La siguiente vez que esa persona come carne roja tendrá una reacción alérgica entre leve y grave.

Un modo en principio seguro y práctico de inducir dicha intolerancia puede ser producir parches de «carne» similares a los de nicotina. Las personas pueden llevar estos parches para atenuar su entusiasmo por la carne roja. Para asegurarnos de que tienen la máxima aceptación, podemos producir parches destinados exclusivamente al tipo de animal que más contribuye a las emisiones de efecto invernadero, de modo que nadie tenga que hacerse por completo vegetariano si no lo desea.

HACER HUMANOS MÁS PEQUEÑOS

La huella ecológica del ser humano está relacionada en parte con nuestro tamaño. Necesitamos una cantidad determinada de alimentos y nutrientes para mantener cada kilogramo de masa corporal. Aunque otras cosas no cambien, cuanto más grandes seamos, más comida y energía necesitaremos. De hecho, la escala del porcentaje metabólico basal (que determina la cantidad de energía necesaria por día) asciende en proporción a la masa corporal y la longitud (Mifflin *et al.* 1990). Además de necesitar comer más, las personas más grandes también consumen más energía de maneras menos obvias. Por ejemplo, un coche consume más combustible por kilómetro para transportar a una persona más pesada que a una más ligera; hace falta más tela para vestir a gente grande que a gente menuda; las personas que pesan más desgastan zapatos, alfombras y muebles a mayor velocidad que las menos pesadas y así sucesivamente.



Un modo de reducir este impacto ecológico sería reducir nuestro tamaño. Como el peso aumenta con el cubo de la longitud, incluso la reducción más insignificante en altura, por ejemplo, podría tener un efecto importante sobre el tamaño. (Al reducir el tamaño, también podríamos reducir el peso medio. Pero para no complicar la explicación, me limitaré a usar el ejemplo de la altura.) Reducir la estatura media de los estadounidenses en solo 15 centímetros significaría una disminución del 23% en la masa de hombres y el 25% en la de mujeres, con sus correspondientes recortes del metabolismo basal (15% y 18%).

¿Cómo se consigue reducir la altura? La estatura está determinada en parte por factores genéticos y, en parte, por la dieta y los concentradores de estrés. Una posibilidad es usar el diagnóstico genético preimplantación (DGP), que se emplea en clínicas de fertilidad como un medio relativamente seguro de evaluar embriones con determinadas enfermedades de transmisión genética. También se podría usar el DGP para seleccionar niños de menor estatura. Esto no implicaría ningún tipo de modificación o alteración del material genético de los embriones, bastaría reconsiderar los criterios de selección de embriones.

También podría valorarse un tratamiento hormonal, bien para modificar los niveles de somatotropina o para provocar el cierre del cartílago del crecimiento antes de tiempo. De hecho, ya se están usando tratamientos hormonales para ralentizar el crecimiento en niños demasiado altos (Grüters *et al.* 1989).

Para terminar, hay una estrecha correlación entre el tamaño al nacimiento y la estatura del adulto (Sorensen *et al.* 1999). La impresión genética, en la que se activa la copia de los genes de uno de los progenitores y se desactiva la del otro, ha demostrado afectar al tamaño del recién nacido como consecuencia de una competición evolutiva entre genes con impresión paterna y materna (Burt y Trivers 2006). Así pues, se podría manipular el tamaño del recién nacido mediante medicamentos o nutrientes que reduzcan la expresión de los genes con impresión paterna o incrementen la expresión de los genes con impresión materna.



REDUCIR LOS ÍNDICES DE NATALIDAD MEDIANTE POTENCIADORES DE LA INTELIGENCIA

En 2008, John Guillebaud, profesor emérito de planificación familiar y salud reproductiva del University College London, y el doctor Pip Hayes, médico de familia de Exeter, señalaron que «cada niño nacido en el Reino Unido será responsable de 160 veces más emisiones de gases de efecto invernadero [...] que cada niño nacido en Etiopía» (Guillebaud y Hayes 2008). Ante esto argumentan que, como medio de mitigar el cambio climático, los británicos deberían considerar no tener más de dos hijos.

Claro que ya existen numerosos métodos para controlar la natalidad, como el uso de anticonceptivos. Pero a la vista del cambio climático parece que tendremos que acelerar el proceso. Hay pruebas contundentes de que la tasa de natalidad baja a medida que mejora el acceso de las mujeres a la educación.⁴ Aunque la razón principal de promover la educación es mejorar los derechos humanos y el bienestar general, la reducción en la fertilidad puede considerarse un efecto colateral positivo desde el punto de vista del cambio climático. En general, parece haber una relación inversamente proporcional entre nivel cognitivo y tasa de natalidad. En Estados Unidos, por ejemplo, las mujeres de baja capacidad cognitiva tienen más probabilidades de tener hijos antes de los dieciocho años (Shearer *et al.* 2002). De ahí que otra posible solución de ingeniería humana sea usar potenciadores de las funciones cognitivas, como el Ritalin y el Modafinil, para reducir los índices de natalidad. Aparte de la educación, hay otros motivos más imperiosos para querer mejorar la inteligencia humana, pero su efecto sobre la fertilidad puede ser deseable como medio de frenar el cambio climático. Aun cuando el efecto cognitivo directo sobre la fertilidad sea menor, los potenciadores de la cognición pueden incrementar la capacidad de las personas de autoeducarse, lo que acabará afectando a la fertilidad y, de forma indirecta, al cambio climático.

ALTRUISMO Y EMPATÍA INDUCIDOS FARMACOLÓGICAMENTE

Muchos problemas ambientales son el resultado de la ausencia de acción colectiva, cuando los individuos no contribuyen al bien común. Pero si las personas estuvieran más dispuestas a actuar en grupo, y tuvieran confianza en que los demás harían lo mismo, podríamos disfrutar de beneficios que solo se consiguen cuando un gran número de individuos actúa en colaboración. La inducción farmacológica del altruismo y la empatía puede aumentar las posibilidades de que esto ocurra (Dietz *et al.* 2003).

Hay indicios de que el altruismo y la empatía tienen una base biológica susceptible de ser alterada mediante fármacos. Por ejemplo, los sujetos de un ensayo clínico a los que se administró la hormona prosocial oxitocina, disponible en farmacias con receta, mostraron más disposición a compartir su dinero con desconocidos y a comportarse con mayor integridad (Zak *et al.* 2007). Un uso experimental de un inhibidor de la recaptación de noradrenalina logró un aumento del grado de compromiso social y cooperación y una reducción del egocentrismo (Tse y Bond 2002). Además, la oxitocina parece mejorar la capacidad de comprender los estados emocionales de otras personas, una característica esencial para la empatía (Guastella *et al.* 2008). Esto sugiere que las intervenciones que afectan a la sensibilidad en estos sistemas



«Si desaparecemos,
la naturaleza continuará,
pero si la naturaleza
desaparece, entonces
ninguno de nosotros
sobrevivirá.»

SEBASTIÃO SALGADO (1944)
Fotógrafo brasileño

Hogueras vomitan nubes de humo blanco en extensiones de bosque tropical destruidas para plantar palma aceitera en Tripa, provincia de Aceh, Indonesia. El aceite de palma se usa como aceite vegetal en productos que van desde chocolatinas o cereales hasta champú. También está clasificado como biocombustible



neuronales también podrían incrementar la voluntad de cooperar con normas u objetivos sociales.

Estos ejemplos son para ilustrar algunas posibles soluciones de ingeniería humana. Otras intervenciones podrían aumentar nuestra resistencia al calor y a las enfermedades tropicales, reducir nuestras necesidades de alimentos y agua y, si nos dejamos llevar por la fantasía, hasta dotar a los humanos de ojos de gato para que puedan ver mejor en la oscuridad y así reducir el consumo energético global.⁵

CASO PRÁCTICO DE INGENIERÍA HUMANA

¿Por qué debemos tomarnos en serio las soluciones de ingeniería humana? Al menos por dos razones: la ingeniería humana es potencialmente menos peligrosa que la geoingeniería y con la ingeniería humana las soluciones de conducta y de mercado tendrían más probabilidades de éxito.

Comparadas con la geoingeniería, las soluciones de ingeniería humana aquí esbozadas se apoyan en tecnología testada y verificada, cuyos riesgos, al menos individualmente, son comparativamente menores y se conocen mejor. Por ejemplo, el DGP —el proceso que nos permitiría seleccionar niños de estatura menor— es una práctica aceptada en muchas clínicas de fertilidad. Y la oxitocina, que podía usarse para incrementar la empatía, ya es un medicamento de prescripción habitual. Además, dado que la ingeniería humana se aplica a los humanos de forma individual, parece que tenemos más posibilidades de controlar sus riesgos frente a los que plantea algo como la geoingeniería, que opera a escala global.

La ingeniería humana también podría hacer que las soluciones de conducta y de mercado tengan éxito del modo siguiente: el altruismo y la empatía farmacológicamente inducidos podrían contribuir a que se produzcan los cambios conductuales y de mercado necesarios para retrasar el cambio climático. La intolerancia farmacológica a la carne podría hacer más sencilla la solución conductual de no comer carne roja para aquellos que lo desean pero les cuesta mucho trabajo.

La ingeniería humana podría asimismo reforzar la libertad más que determinadas soluciones de conducta y mercado. Como hemos visto, ante la gravedad del cambio climático, algunas personas han propuesto controlar la reproducción humana y adoptar algo parecido a la política china del hijo único (Conly 2016). Sin embargo, supongamos que el problema en cuestión es determinar un cierto tipo de asignación fija de emisiones de gases de efecto invernadero por familia. Si es así, una vez fijada la tasa de emisiones de efecto invernadero, la ingeniería humana podría dar a las familias la opción de elegir entre tener un hijo alto, dos de mediana estatura o tres de baja estatura. En este contexto, la ingeniería humana parece fomentar más la libertad que una política que diga que solo se pueden tener uno o dos hijos.

Por otro lado, algunas de las soluciones de ingeniería humana podrían favorecer a todas las partes, en el sentido de que los efectos deseables de su implantación se producirán casi seguro, con independencia de su efectividad a la hora de frenar el cambio climático. Por ejemplo, si la mejora cognitiva resulta eficaz para reducir el índice de natalidad, podría permitir a China limitar o abandonar por completo su controvertida política del hijo único. Al mismo tiempo, una cognición mejorada tiene un gran valor en sí misma. De manera similar, si la intolerancia farmacológica a la carne es útil en la reducción de gases de efecto invernadero producto de la cría de determinadas especies de animales para el consumo, podríamos reducir la necesidad de gravar



fiscalmente las conductas indeseables. Además, los beneficios para la salud de comer menos carne roja y el consecuente alivio del sufrimiento de los animales criados para el consumo son en sí mismos aspectos positivos.

De manera más general, aparte de ayudar a mitigar el cambio climático, la ingeniería humana podría ayudarnos a resolver otros problemas acuciantes del mundo moderno: con personas de menor estatura, más consideradas y que consumen menos carne podrían abordarse mejor las complicaciones asociadas a una demanda insostenible de energía y a la escasez de agua.

Llegados a este punto, debemos reiterar que la ingeniería humana está pensada como una actividad voluntaria. Estoy por completo en contra de que unas personas obliguen a otras a aceptar estas medidas farmacológicas. La idea es que existen individuos que desean hacer lo correcto pero, por falta de voluntad, no lo consiguen. Al ofrecer la opción de la ingeniería humana, como en el caso del altruismo farmacológico, podemos ayudar a reforzar su voluntad y hacer lo correcto.

POSIBLES MOTIVOS DE PREOCUPACIÓN RELATIVOS A LA INGENIERÍA HUMANA

Como todos los tratamientos biomédicos —incluidos los que se recetan de forma rutinaria—, la ingeniería humana entraña riesgos. Esto quiere decir que, antes de persuadir a las personas de que se sometan a ingeniería humana, es necesario minimizar sus peligros.

Dicho esto, los riesgos deberán evaluarse en relación con los que acarrearía no emprender las acciones correctas para combatir el cambio climático. Si las soluciones conductuales y de mercado no bastan para mitigar los efectos del cambio climático, entonces, incluso si la ingeniería humana entrañara más riesgo que estas otras soluciones, tal vez habría que tenerla en cuenta. Por otro lado, es importante no exagerar sus riesgos. Es una posibilidad muy realista, ya que las personas por lo general toleran peor los riesgos que plantean tecnologías novedosas y poco conocidas que los que tienen un origen que les resulta familiar (Slovic 1987). Para contrarrestar este efecto, es conveniente recordar que gran parte de la tecnología utilizada en ingeniería humana —como el DGP y la oxitocina— ya está siendo utilizada con todas las garantías para otros fines y que, en contextos sin amenaza de cambio climático, nuestra sociedad ya se ha mostrado partidaria de intervenciones biomédicas que afecten a toda la población. Así, se añade flúor al agua de forma deliberada para fortalecer nuestras dentaduras, incluso cuando no está exento de riesgos. Del mismo modo, los individuos se vacunan periódicamente para evitar que ellos y quienes los rodean contraigan enfermedades infecciosas, aun cuando las vacunas tienen efectos secundarios que pueden incluso causar la muerte. Por lo tanto, y desde el punto de vista de la seguridad, parece que debemos juzgar la ingeniería humana caso por caso, y no descartarla sin más.

A otros puede preocuparles el hecho de que la ingeniería humana implica interferir en la naturaleza. En el debate actual sobre perfeccionamiento biomédico humano, Michael Sandel argumenta que responde a «una voluntad prometeica de rehacer la naturaleza, incluida la humana, para servir a nuestros fines y satisfacer nuestros deseos» (Sandel 2007). Dado que la ingeniería humana usa medios biomédicos para combatir el cambio climático, a algunos podría preocuparles que este problema se dé también en la ingeniería humana. De hecho,





numerosos ecologistas opinan que nuestra interferencia con la naturaleza es precisamente lo que ha provocado el cambio climático. Por lo tanto, podrían oponerse a la ingeniería humana con el argumento de que interfiere demasiado en la naturaleza.

Aunque no les falte razón, la idea de que «es moralmente inaceptable interferir en la naturaleza humana, porque significa interferir en la naturaleza e interferir en la naturaleza es moralmente inaceptable» se antoja demasiado rotunda. Las vacunas y la anestesia epidural durante el parto interfieren en la naturaleza, pero nadie diría por ello que su uso es moralmente inaceptable. Además, no todas las soluciones de ingeniería humana suponen interferir en la naturaleza humana, si por interferir entendemos hacer modificaciones en los individuos. La selección de niños de menor estatura mediante el DGP, por ejemplo, no implica mayor interferencia en la naturaleza que un proceso estándar de fecundación in vitro, algo que no se considera, por lo general, éticamente dudoso.

Además, si la ingeniería humana consiguiera mitigar los efectos del cambio climático, la interferencia humana en la naturaleza en términos generales podría reducirse de manera notable. Por último, Sandel rebate el perfeccionamiento humano en parte porque muchas personas quieren usarlo para «servir a nuestros fines y satisfacer nuestros deseos». Pero la ingeniería humana, tal como yo la veo, es un proyecto ético, porque mitigar el cambio climático puede mejorar el bienestar de muchas personas y animales vulnerables a sus efectos. En este sentido, creo que incluso los que opinen como Sandel aprobarán los objetivos de la ingeniería humana.

Otra fuente de preocupación de la ingeniería humana es que algunas de sus soluciones puedan afectar a niños de modo a veces irreversible. Puedo asegurar que no todas las soluciones de ingeniería humana que afectan a niños son polémicas. Por ejemplo, como padres, ¿de verdad rechazaríamos el uso de potenciadores cognitivos de nuestros hijos como medio de reducir los índices de natalidad? Hay pruebas de que muchos padres son partidarios de administrar a sus hijos potenciadores cognitivos como el Ritalin. Por supuesto, hay otras soluciones de ingeniería humana que afectan a niños y que sí pueden ser polémicas, como los tratamientos hormonales. En estos casos ciertamente surgirían dudas sobre la autonomía presente y futura del niño y los límites de la autoridad paterna (Liao 2005). Aun así, cabe señalar que ya hay padres que autorizan los tratamientos hormonales para sus hijos, que están perfectamente sanos, con el fin de que, por ejemplo, una niña a la que se le ha pronosticado una altura de 1,96 pueda quedarse en 1,83. ¿Con qué argumento, entonces, podemos reprochar a otros padres que deseen administrar tratamientos hormonales a sus hijos para que midan 1,75 en lugar de 1,80? Cabría pensar que, en el primer caso, las niñas agradecerán y aceptarán la decisión paterna más adelante en sus vidas. Pero el cambio climático afectaría gravemente al bienestar de millones de personas, incluidos nuestros hijos, que tal vez en un futuro también agradezcan y acepten la decisión paterna.

Como observación general, merece la pena preguntarse por qué habríamos de considerar siquiera las formas más controvertidas de ingeniería humana. Podría ser porque existen pruebas de que las soluciones existentes para



mitigar el cambio climático no están teniendo los efectos buscados, y que por consiguiente millones de personas podrían sufrir hambrunas, escasez de agua, enfermedades y los efectos de inundaciones costeras. En la literatura sobre perfeccionamiento biomédico hay autores que opinan que, por muy controvertida que sea una tecnología, los padres tienen el derecho social y biológico a modificar a sus hijos en aras de su bienestar general y siempre que no exista un alternativa mejor. Ante la gravedad del cambio climático, y dada la posible ausencia de soluciones alternativas, podríamos concluir que si una solución concreta de ingeniería humana puede mejorar el bienestar general del niño, entonces los padres tienen derecho a ponerla en práctica, por controvertida que resulte.

La última preocupación que quiero abordar es la del escaso atractivo de la ingeniería humana. Porque, ¿quién en su sano juicio decidiría tener hijos de menor estatura?

A modo de respuesta, cabe recordar en primer lugar que, por tentador que resulte centrarse en los ejemplos más provocativos, no toda la ingeniería humana carece de atractivo. Después de todo, los potenciadores cognitivos y los medios farmacológicos de combatir el apetito de carne resultan deseables para muchas personas, ya que la mejora de la inteligencia y los beneficios para la salud de reducir el consumo de carne roja son buenos en sí mismos.

En segundo lugar, es comprensible que algunas personas reaccionen mal ante la idea de tener hijos más pequeños, ya que en nuestra sociedad ser alto suele considerarse una ventaja. De hecho, hay estudios que sugieren que las mujeres encuentran más atractivos a los hombres altos que a los bajos, y que las personas más altas triunfan más profesionalmente (Kurzban y Weeden 2005; Judge y Cable 2004). Sin embargo, el hecho de que una solución concreta de ingeniería humana pueda no atraer a algunas personas no es motivo para que no esté disponible. Porque, entre otras cosas, lo que hoy puede no resultar atractivo tal vez lo sea mañana. De hecho, la actitud social hacia el vegetarianismo ha cambiado de manera drástica como consecuencia de su nuevo estatus ético. También merece la pena tener en cuenta lo cambiantes que son características humanas como la altura. Hace cien años la gente era mucho más baja de media, y no debido a problemas médicos. Habría que desconfiar de la idea de que existe una estatura óptima, a saber, la estatura media de nuestra sociedad actual, ya que puede responder simplemente a prejuicios causados por una falta de perspectiva. Por último, debo señalar que ser pequeño podría resultar ventajoso en gran cantidad de circunstancias; basta comprobar la rapidez a la que se reduce el tamaño de los asientos en los aviones. Por otro lado, ¿cuántos centenarios, es decir, personas de más de cien años, miden





más de 1,85? Hay indicios de que las personas más altas tienen un riesgo mayor de contraer cáncer y enfermedades respiratorias y cardiovasculares (Kabat *et al.* 2013). Es más, ahora que nos preparamos para explorar Marte⁶ y otros planetas, parece probable que se fije un límite de altura para los astronautas, no solo por el coste de combustible, también de los recursos necesarios para mantener a la tripulación.

Para entender que tener niños más pequeños no tiene por qué ser poco atractivo, basta imaginar que se hubiera dado a nuestros antepasados preindustriales la posibilidad de elegir entre: a) un mundo poblado por 9.000 millones de personas que han intervenido en su biología de modo que la mayoría son de menor estatura y que, como consecuencia, habitan un mundo sostenible; b) un mundo poblado por 9.000 millones de personas que no han intervenido en su estatura y por tanto habitan un mundo no sostenible; y c) un mundo poblado por 6.000 millones de personas que no han intervenido en su estatura y habitan un mundo sostenible. No es obvio que para nuestros antepasados preindustriales la opción a) resultara la menos atractiva. De hecho, parece plausible que la prefirieran a la b) o la c), porque a) permite que viva más gente en un mundo sostenible. Si es así, al desechar determinadas soluciones de ingeniería humana por poco atractivas, deberíamos asegurarnos de que con ello no estemos apoyando de forma implícita circunstancias más familiares pero sin duda menos deseables.

CONCLUSIÓN

Espero haber trazado algunos escenarios plausibles acerca de lo que podrían suponer las soluciones de ingeniería humana al cambio climático. He argumentado que la ingeniería humana es potencialmente menos peligrosa que la geoingeniería y que podría reforzar las posibilidades de éxito de las soluciones conductuales y de mercado. También he examinado posibles fuentes de preocupación suscitadas por la ingeniería humana y sugerido algunas respuestas.

Puede que la ingeniería humana no resulte ser la mejor vía para frenar el cambio climático. Pero admitir esto ahora sería pasar por alto el hecho, de sobra conocido, de que a día de hoy no sabemos qué soluciones al cambio climático serán las más eficaces.

Para combatir el cambio climático podemos cambiar el medio o cambiar nosotros. Dados los enormes riesgos asociados con los cambios en el medio, deberíamos tomarnos en serio la idea de que tal vez tengamos que cambiar nosotros.



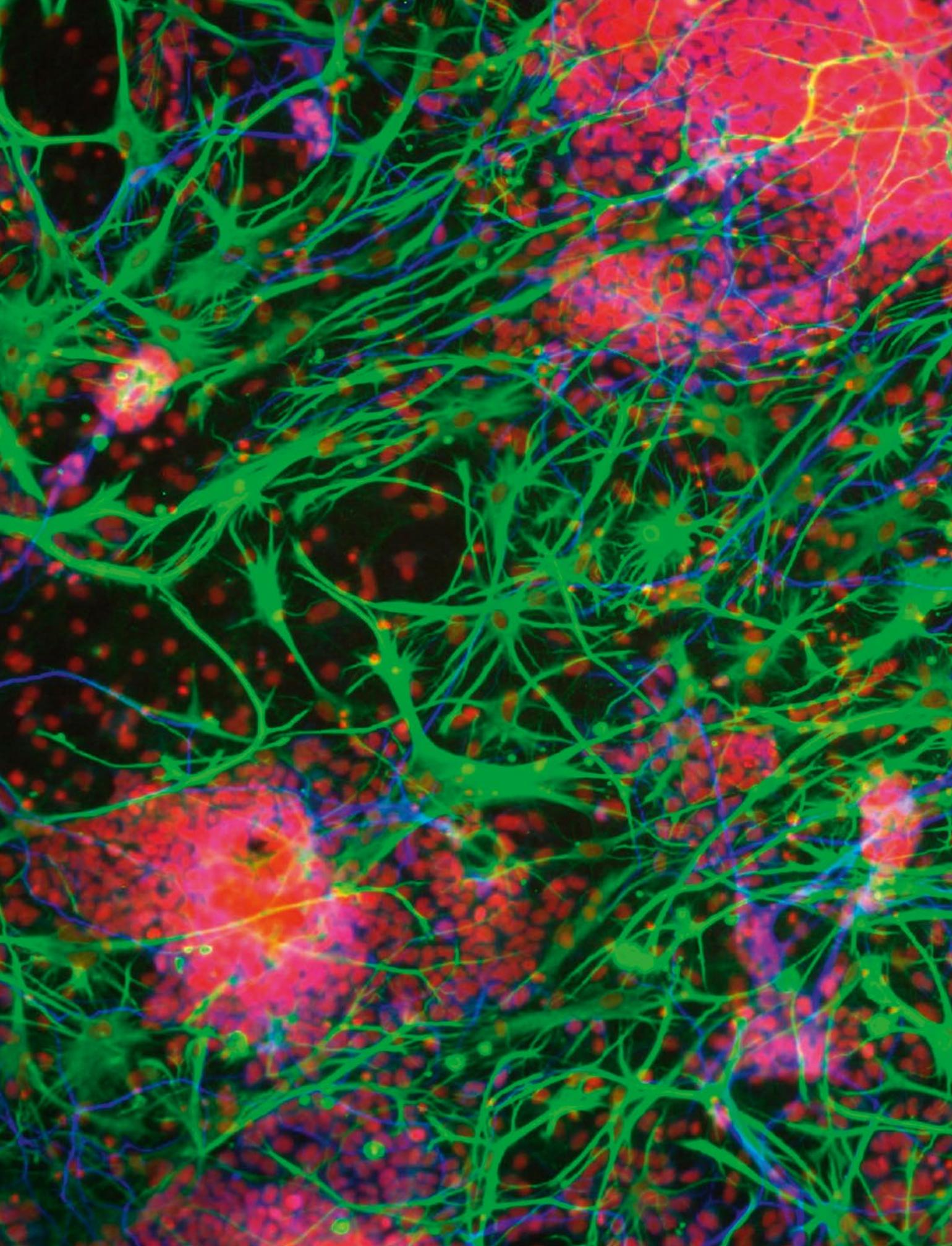
NOTAS

1. Véase <http://www.climatecentral.org/news/world-passes-400-ppmthreshold-permanently-20738> (consultado el 1 de octubre de 2016).
2. Comité de Ciencia y Tecnología de la Cámara de los Communes, «The regulation of geoengineering», 2010, 5º informe de la sesión 2009-2010. <http://www.publications.parliament.uk/pa/cm200910/cmselect/cmsctech/221/221.pdf>
3. Véase <https://www.dtnpf.com/agriculture/web/ag/news/livestock/article/2016/04/25/lone-star-tickbite-can-create-beef> (consultado el 1 de octubre de 2016).
4. Naciones Unidas, *Women's Education and Fertility Behaviour: Recent Evidence from the Demographic and Health Surveys*, Nueva York, Naciones Unidas, 1995.
5. Véase <http://www.theadaptors.org/episodes/2015/2/11/cat-eyes-forclimate-change> (consultado el 1 de octubre de 2016).
6. Véase <http://www.nasa.gov/content/nasas-journey-to-mars> (consultado el 1 de octubre de 2016).



BIBLIOGRAFÍA

- Burt, A. y Trivers, R., *Genes in Conflict: the Biology of Selfish Genetic Elements*, Cambridge, Massachusetts, Belknap Press, 2006.
- Comité de Ciencia y Tecnología de la Cámara de los Communes, «The Regulation of Geoengineering», 2010, 5º informe de la sesión 2009-2010. <http://www.publications.parliament.uk/pa/cm200910/cmselect/cmsctech/221/221.pdf>
- Conly, S., *One Child: Do We Have a Right to More?*, Nueva York, Oxford University Press, 2016.
- Dietz, T., Ostrom, E. y Stern, P. C., «The Struggle to Govern the Commons», en *Science*, vol. 302, n.º 5.652, 2003, pp. 1.907-1.912.
- Eshel, G. y Martin, P. A., «Diet, Energy, and Global Warming», en *Earth Interactions*, vol. 10, n.º 9, 2006, pp. 1-17.
- Fuentes Aparicio, V., Sánchez Marcén, I., Pérez Montero, A., Baeza, M. L. y de Barrio Fernández, M., «Allergy to Mammal's Meat in Adult Life: Immunologic and Follow-up Study», en *Journal of Investigational Allergology and Clinical Immunology*, vol. 15, n.º 3, 2005, pp. 228-231.
- Goodland, R. y Anhang, J., «Livestock and Climate Change: What if the Key Actors in Climate Change Are... Cows, Pigs, and Chickens?», en *World Watch*, noviembre/diciembre de 2006, pp. 10-19.
- Greenblatt, J. B. y Wei, M., «Assessment of the Climate Commitments and Additional Mitigation Policies of the United States», en *Nature Climate Change*, publicación electrónica, 2016.
- Grüters, A., Heidemann, P., Schlüter, H., Stubbe, P., Weber, B. y Helge, H., «Effect of Different Oestrogen Doses on Final Height Reduction in Girls with Constitutional Tall Stature», en *European Journal of Pediatrics*, vol. 149, n.º 1, 1989, pp. 11-13.
- Guastella, A. J., Mitchell, P. B. y Dadds, M. R., «Oxytocin Increases Gaze to the Eye Region of Human Faces», en *Biological Psychiatry*, vol. 63, n.º 1, 2008, pp. 3-5.
- Guillebaud, J. y Hayes, P., «Population Growth and Climate Change», en *British Medical Journal*, vol. 337, n.º a576, 2008.
- Hedenus, F., Wirsenius, S. y Johansson, D. J. A., «The Importance of Reduced Meat and Dairy Consumption for Meeting Stringent Climate Change Targets», en *Climatic Change*, vol. 124, n.º 1-2, 2014, pp. 79-91.
- IPCC, «IPCC Fourth Assessment Report 2007», informe «Impacts, Adaptation and Vulnerability», Grupo de Trabajo II, 2007.
- Johnson, K. A. y Johnson, D. E., «Methane Emissions from Cattle», en *Journal of Animal Science*, vol. 73, n.º 8, 1995, pp. 2.483-2.492.
- Judge, T. A. y Cable, D. M., «The Effect of Physical Height on Workplace Success and Income: Preliminary Test of a Theoretical Model», en *Journal of Applied Psychology*, vol. 89, n.º 3, 2004, pp. 428-441.
- Kabat, G. C., Anderson, M. L., Heo, M., Hosgood, H. D., Kamensky, V., Bea, J. W., Hou, L., Lane, D. S., Wactawski-Wende, J., Manson, J. E. y Rohan, T. E., «Adult Stature and Risk of Cancer at Different Anatomic Sites in a Cohort of Postmenopausal Women», en *Cancer Epidemiology Biomarkers & Prevention*, vol. 22, n.º 8, 2013, pp. 1.353-1.363.
- Keith, D. W., «Geoengineering the Climate: History and Prospect», en *Annual Review of Energy and the Environment*, vol. 25, 2000, pp. 245-284.
- Kurzban, R. y Weeden, J., «Hurrydate: Mate Preferences in Action», en *Evolution and Human Behavior*, vol. 26, n.º 3, 2005, pp. 227-244.
- Liao, S. M., «The Ethics of Using Genetic Engineering for Sex Selection», en *Journal of Medical Ethics*, vol. 31, n.º 2, 2005, pp. 116-118.
- Liao, S. M., Sandberg, A. y Roache, R., «Human Engineering and Climate Change», en *Ethics, Policy & Environment*, vol. 15, n.º 2, 2012, pp. 206-221.
- Mifflin, M. D., Stjeor, S. T., Hill, L. A., Scott, B. J., Daugherty, S. A. y Koh, Y. O., «A New Predictive Equation for Resting Energy—Expenditure in Healthy—Individuals», en *American Journal of Clinical Nutrition*, vol. 51, n.º 2, 1990, pp. 241-247.
- Naciones Unidas, *Women's Education and Fertility Behaviour: Recent Evidence from the Demographic and Health Surveys*, Nueva York, Naciones Unidas, 1995.
- Rieder, T. N., *Toward a Small Family Ethic: How Overpopulation and Climate Change Are Affecting the Morality of Procreation*, Nueva York, Springer, 2016.
- Sandel, M., *The Case against Perfection: Ethics in the Age of Genetic Engineering*, Harvard, Harvard University Press, 2007.
- Shearer, D. L., Mulvihill, B. A., Klerman, L. V., Wallander, J. L., Hovinga, M. E. y Redden, D. T., «Association of Early Childbearing and Low Cognitive Ability», en *Perspectives on Sexual and Reproductive Health*, vol. 34, n.º 5, 2002, pp. 236-243.
- Shishlov, I., Morel, R. y Bellassen, V., «Compliance of the Parties to the Kyoto Protocol in the First Commitment Period», en *Climate Policy*, vol. 16, n.º 6, 2016, pp. 768-782.
- Slovic, P., «Perception of Risk», en *Science*, vol. 236, n.º 4.799, 1987, pp. 280-285.
- Sorensen, H. T., Sabroe, S., Rothman, K. J., Gillman, M., Steffensen, F. H., Fischer, P. y Sorensen, T. I. A., «Birth Weight and Length as Predictors for Adult Height», en *American Journal of Epidemiology*, vol. 149, n.º 8, 1999, pp. 726-729.
- Tse, W. S. y Bond, A. J., «Difference in Serotonergic and Noradrenergic Regulation of Human Social Behaviours», en *Psychopharmacology*, vol. 159, n.º 2, 2002, pp. 216-221.
- Washington, W. M., Knutti, R., Meehl, G. A., Teng, H., Tebaldi, C., Lawrence, D., Buja, L. y Strand, W. G., «How Much Climate Change Can Be Avoided by Mitigation?», en *Geophysical Research Letters*, vol. 36, n.º 8, 2009.
- Weber, C. L. y Matthews, H. S., «Food-miles and the Relative Climate Impacts of Food Choices in the United States», en *Environmental Science & Technology*, vol. 42, n.º 10, 2008, pp. 3.508-3.513.
- Zak, P. J., Stanton, A. A. y Ahmadi, S., «Oxytocin Increases Generosity in Humans», en *PLoS ONE*, vol. 2, n.º 11, 2007, pp. 1-5.



**Progreso
neurotecnológico.
Necesidad de una
neuroética**

JAMES GIORDANO

Imagen de apertura:
Micrografía con fluorescencia de
células nerviosas derivadas de células
madre embrionarias humanas (HESC)



James Giordano
Georgetown University, Washington D. C., EEUU

James Giordano es científico jefe en la Oficina Vicepresidencial para la Investigación de la Universidad de Georgetown, profesor en los departamentos de Neurología y Bioquímica y jefe del Programa de Estudios Neuroéticos del Pellegrino Center for Clinical Bioethics del Georgetown University Medical Center en Washington D. C. En la actualidad, su trabajo se centra en cuestiones neuroéticas surgidas del uso de neurotecnologías avanzadas en los ámbitos de la medicina, la vida pública y la seguridad nacional. Es autor de más de 230 artículos y siete libros sobre neurociencia y neuroética, y de 11 libros blancos sobre neurociencia.

El uso de técnicas y tecnologías cada vez más avanzadas ha hecho posible realizar descubrimientos en muy poco tiempo y progresos en la investigación del cerebro con variadas aplicaciones en la medicina, la vida pública y la seguridad nacional. Estos avances plantean un sinnúmero de preguntas y problemas generados tanto por lo novedoso de las herramientas y técnicas como por los efectos sociales que pueden desatar la información y las prácticas nuevas. La neuroética es el campo de estudio que aborda específicamente estas cuestiones. Este capítulo describe los nuevos avances, plantea problemas y preguntas de neuroética y propone enfoques para el compromiso neuroético y directrices para el conocimiento y las destrezas neurocientíficas.

AVANCES E INFLUENCIA DE LA NEUROCIENCIA Y LA TECNOLOGÍA (NEUROC/T)

La neurociencia progresa a gran velocidad, estimulada por métodos más convergentes y multidisciplinares (Giordano 2012a) que permiten un enfoque basado en sistemas e integrativo del desarrollo y uso aplicado de tecnologías y técnicas neurocientíficas (o neuroC/T; Giordano 2012a, 2012b). La investigación y las aplicaciones de la neuroC/T tienen como objetivo evaluar y tratar una serie de desórdenes y trastornos neuropsiquiátricos, y su prestigio crece como medio de actuación sobre los sustratos neurales de la cognición, la emoción y el comportamiento, para modificar así aspectos del rendimiento humano, por no decir de la personalidad.

En líneas generales, la neuroC/T podría definirse como aquellos métodos y dispositivos que se utilizan para acceder a evaluar o actuar sobre sistemas neurales. Tal y como se describe en la Tabla I, estos enfoques se pueden clasificar en:

1. NeuroC/T evaluativa, que incluye métodos genéticos, genómicos y proteómicos, varias formas de neuroimagen (por ejemplo, tomográfica y magnética; encefalografía cuantitativa y magnética) y análisis de biomarcadores para funciones neurológicas y enfermedades neuropsiquiátricas concretas.
2. NeuroC/T intervencionista, que incluye medicamentos neuropsicotrópicos y métodos farmacológicos novedosos, dispositivos neuromoduladores, como por ejemplo la estimulación magnética transcraneal (EMT) o la estimulación eléctrica transcraneal (EET), la estimulación cerebral profunda (ECP) y los estimuladores de nervios craneales y periféricos, así como implantes y trasplantes de tejido neural y genético y sistemas neuroprotésicos de interfaz cerebro-máquina.



**CATEGORÍAS DE
NEUROCIENCIA Y
NEUROTECNOLOGÍA
(NEUROC/T)**

NeuroC/T evaluativa

Estudios (neuro)genéticos y genómicos

Análisis de biomarcadores

Neuroimagen

Tomografía computarizada (TC)

Tomografía computarizada por emisión de fotón único (TCEFU)

Tomografía por emisión de positrones (TEP)

Resonancia magnética (RM)

Resonancia magnética funcional (RMf)

Imagen por tensor de difusión (ITD) e imagen de difusión por kurtosis (IDC)

Métodos neurofisiológicos

Electroencefalografía (EEG)

Electroencefalografía cuantitativa (EEGc)

Magnetoencefalografía (MEG)

NeuroC/T intervencionista

Fármacos neurotrópicos y psicotrópicos

Implantes/trasplantes de tejido neuronal

Implantes/trasplantes neurogenéticos

Dispositivos de estimulación craneal y nervios periféricos

Dispositivos de neuromodulación transcraneal

Estimulación eléctrica transcraneal (EEt)

Estimulación por corriente directa transcraneal (ECDt)

Estimulación por corriente alterna transcraneal (ECAt)

Dispositivos neuromoduladores implantados quirúrgicamente

Estimulación cerebral profunda (ECP)

TABLA I

Sin duda, la especialidad —y sus dominios de aplicación y uso— avanza muy rápido, impulsada por múltiples aportaciones que compiten por obtener resultados concretos, y también por «premios» a la innovación, el descubrimiento, el reconocimiento y los beneficios económicos, y como tales pueden considerarse «el carril rápido de la neuroC/T». Reflejo de la validez de la analogía con la pista de carreras es su entorno altamente competitivo, que aunque ofrece beneficios medibles tanto a inversores como a partes interesadas, no está exento de riesgos, por no decir peligros, a medida que la neuroC/T interactúa más activamente con el medio social (Giordano 2016a).

En la actualidad, los apoyos gubernamentales y privados como el que proporcionan los programas Investigación del Cerebro a través del Avance de Neurotecnologías Innovadoras (BRAIN, por sus siglas en inglés), en Estados Unidos, y Proyecto Cerebro Humano, en la Unión Europea, han permitido un rápido desarrollo de ideas, conceptos, destrezas y



dispositivos nuevos que están siendo aplicados en la medicina, la vida pública, las relaciones internacionales y la seguridad global. Tanto el crecimiento como las diversas aplicaciones se reflejan cada vez más en las numerosas publicaciones internacionales especializadas revisadas por pares (Giordano 2012a) y en las patentes de neurotecnologías (Lynch y McCann 2010; NeuroInsight 2015).

Las herramientas de la neurociencia han ganado protagonismo como medio de acceder, evaluar y manipular la estructura y las funciones cerebrales, y esta información y estas capacidades, aunque incipientes y contingentes, suponen un potencial de largo alcance para transformar las normas médicas, éticas, legales y culturales, el estatus ontológico y la acción social. Se *puede* hacer mucho con la neurociencia y sus herramientas, pero en todos y cada uno de los casos es importante considerar qué *debería* hacerse, dadas las fronteras del conocimiento y la tecnología neurocientífica, las realidades socioculturales, los postulados morales vigentes y la posibilidad de usar cualquier herramienta científica y tecnológica para provocar el bien o el mal.

En primer plano está la necesidad de considerar la neurociencia un empeño humano y de asumir la responsabilidad por la bondad o maldad de las aplicaciones del conocimiento científico. Las investigaciones del cerebro abren nuevas perspectivas de comprensión y pueden alterar la manera en la que los seres humanos y no humanos, como por ejemplo animales, máquinas artificialmente inteligentes, etcétera, son vistos y tratados. Además, la neurociencia proporciona medios para controlar la cognición, la emoción y la conducta. Aunque el uso de estas destrezas puede estar guiado por motivos «loables», la neurociencia no se pone en práctica en un vacío social y, por tanto, las intervenciones y manipulaciones de neuroC/T están sujetas a las influencias del mercado y de la orientación política. Así pues, es vital preguntarnos cómo se utilizarán y distribuirán estos bienes y recursos y qué efectos tendrán su uso y su aplicación en individuos, colectivos y la sociedad en general.

La necesidad de innovar, lo novedoso de los enfoques, las limitaciones actuales del conocimiento y las incertidumbres resultantes de los beneficios, cargas y perjuicios relativos de la neuroC/T tienen un gran número de implicaciones neuroéticas, legales y sociales o INELS. Tal y como se ilustra en la Tabla II, estas INELS se pueden clasificar en:

1. Las que son específicas de las cualidades, los parámetros, las ambigüedades y los problemas inherentes a las técnicas y mecanismos complejos y sofisticados actualmente en desarrollo.
2. Las surgidas de las crecientes aplicaciones de la neuroC/T, el uso inadecuado de conocimientos o capacidades neurocientíficas o la comercialización de la neurotecnología, teniendo en cuenta la cada vez más diversa naturaleza de la cultura global del siglo XXI, las multinacionales y el apoyo político a la investigación, el desarrollo y uso de la neuroC/T (Giordano y Benedikter 2012a, 2012b; Hughes 2006; Lanzilao *et al.* 2013; Lynch y McCann 2010; NeuroInsights 2015). Estas cuestiones no son mutuamente excluyentes, sino más bien interactivas y a menudo de efectos recíprocos; por tanto, abordarlas y solucionarlas requiere un enfoque interdisciplinar (Giordano 2010; Giordano y Olds 2010).



Una paciente en el momento de realizarse una tomografía computarizada. Este método de exploración radiológica permite el estudio de un órgano, especialmente el cerebro, desde distintos planos





CATEGORÍAS DE IMPLICACIONES NEUROÉTICAS

TABLA II

Inherentes a la tecnología

Ciencia y tecnología novedosas, de «vanguardia»
Mecanismos desconocidos
Efectos imprevistos
Efectos descontrolados

Derivadas de la sociedad/principales

Percepción/interpretación errónea de capacidades, limitaciones o significado/valor
Uso inapropiado o incorrecto
Manipulación económica
Provisión/comercialización de recursos
Variabilidad cultural de necesidades, valores, uso o acceso

PREGUNTAS NEUROÉTICAS PRIMARIAS

En mi opinión es necesario plantear tres preguntas primarias y tres derivadas para indagar sobre los diferentes usos que debería tener la neuroC/T (Giordano 2011, 2014, 2016a).

Antes de formularlas es esencial preguntar: *¿cuáles son las capacidades reales de tipo específico (evaluativas e intervencionistas) de la neuroC/T?* Las capacidades y limitaciones de una tecnología o técnica particular determinan cómo y hasta qué punto estas herramientas pueden usarse de manera válida y fiable para describir, definir y alterar la estructura y la(s) función(es) cerebrales relativas que influyen en el estado, las condiciones y las capacidades neuropsiquiátricas. Dicho con sencillez, *¿qué pueden hacer realmente* las herramientas de la neurociencia? Realizar un análisis exhaustivo de las capacidades y limitaciones de variadas formas de neuroC/T no tiene cabida en este capítulo; para una visión general y una reflexión sobre las INELS resultantes, veáanse otros textos (Giordano 2012b, 2016a, 2016b).

La supuesta validez de la neuroC/T actual asigna un valor relativo al uso de determinadas técnicas y tecnologías hoy en día. Por tanto, una segunda pregunta fundamental es *si, y de qué maneras, la neuroC/T intervencionista, por ejemplo, fármacos, dispositivos neuromoduladores, etcétera, podría usarse, o utilizarse indebidamente, para tratar desórdenes neuropsiquiátricos o modificar aspectos fundamentales de la personalidad o «del ser»*. Identificar las capacidades técnicas de la neuroC/T permite definir las formas de actuación de ciertas herramientas y técnicas sobre determinados sustratos para alterar mecanismos y procesos cognitivos, emocionales o de comportamiento. Aquí, la frontera entre cuestiones y preguntas inherentes a un enfoque neuroC/T, por ejemplo, capacidades, limitaciones, efectos, etcétera, y las derivadas de sus posibles aplicaciones (definir, evaluar y tratar desórdenes neurológicos y psiquiátricos y alterar las funciones y el rendimiento neurocognitivo) se desdibuja. En el fondo existe una dependencia heurística que nosotros llamamos «constructores de sesgo»; a saber, que las herramientas empleadas para establecer bases teóricas, y también para lo



que se considera funcional o disfuncional, normal o anormal, crean —si es que no estimulan y sostienen— el impulso y la justificación del uso con el fin de alterar las estructuras y funciones que son axiomáticas a esta clase de planteamientos teóricos (Giordano 2010).

Hemos sugerido que las distinciones operativas —y socialmente reconocidas— de función, distinción y normas establecen un umbral a partir del cual determinar si una intervención neurológica puede considerarse un «tratamiento», por ejemplo, para prevenir, mitigar o revertir una disfunción, un desorden o una «enfermedad» concretos, o una «mejora», como cambiar la cognición, la emoción o el comportamiento de maneras que supongan una optimización reconocida de determinados aspectos del rendimiento (Gini, Rossi y Giordano 2010; Gini y Giordano 2010; Shook y Giordano 2016). De hecho, existe amplia y variada literatura acerca de si la neuroC/T constituye tratamiento o «mejora» sobre las INELS generadas por dicho uso (para una bibliografía completa, véase Martin *et al.* 2016) y también sobre si lo que constituye tratamiento o mejora promueve posteriores investigaciones acerca de la implantación/realización, y disponibilidad, de diversas intervenciones en individuos, grupos (por ejemplo, profesionales, incluido un posible uso directo y dual para fines militares) y países (desarrollados, en desarrollo o sin desarrollar).

Ampliar el debate para contemplar el uso (o uso indebido o ausencia de uso) de la neuroC/T a escala internacional plantea la tercera pregunta primaria, es decir:

¿Cómo influirán y de qué maneras se querrá que influyan los mercados para la neuroC/T en la comercialización y la economía global de los recursos y servicios neurocientíficos y tecnológicos? La neurociencia constituye un mercado significativo que ha tenido un excedente de 150.000 millones en ingresos anuales, lo que supone cerca del 5% de crecimiento neto. La tendencia globalizadora en neuroC/T se refleja, según cálculos recientes, en un aumento de más del 60% en 2005 en investigación y aplicación (médica, pública y militar) de tecnologías y técnicas de neuroC/T, con importantes beneficios para iniciativas asiáticas y sudamericanas (Lynch y McCann 2010; NeuroInsights 2015). Que estos esfuerzos puedan equipararse o superar los empeños occidentales servirá para subrayar la capacidad económica —y el poder— que puede desencadenar la neuroC/T, así como la necesidad de reconocer y admitir filosofías, valores y prácticas multiculturales a la hora de abordar, y de tratar de resolver, las INELS y las formas en las que el discurso neuroético inspira directrices, políticas y leyes nacionales e internacionales (Anderson, Fitz y Howlader 2012; Lanzilao, Shook, Benedikter y Giordano 2013; Shook y Giordano 2014).

PREGUNTAS NEUROÉTICAS DERIVADAS

A partir de estas preguntas primarias surgen tres más que son centrales a la hora de ver si puede emplearse la neuroC/T, y cómo, en distintos ámbitos de la sociedad. La primera es: *¿cómo se obtendrán nuevas y necesarias percepciones, si es que se obtienen, de la evaluación de la neuroC/T que permitan identificar las verdaderas fortalezas y limitaciones de dichos enfoques?* La segunda es: *¿se actuará, y de qué forma, con la prudencia suficiente al determinar si se emplearán, y cuándo y cómo, los resultados y herramientas de la neuroC/T de maneras específicas dentro del ámbito médico, social, legal e incluso político?* La tercera, aunque no por ello la menos importante, es: *¿qué sistema(s) ético(s) —si es que hay alguno— será(n) más idóneo(s) para sopesar y proporcionar directrices sobre la viabilidad y el valor de emplear neuroC/T en los casos y entornos ya mencionados a escala tanto local como global?* (Giordano 2014).

ENFOQUE PARADIGMÁTICO DE LA NEUROÉTICA

A la hora de abordar estas preguntas —y de desarrollar posibles respuestas— he argumentado que una postura simplemente precavida, por mucho que busque maximizar los beneficios y reducir el riesgo y los daños potenciales, sería inadecuada, puesto que resultará excesivamente prescriptiva al tener en cuenta la realidad de las cargas y los peligros que se dan en la ciencia y la tecnología a medida que se vuelven más y más vulnerables a efectos no previstos o usos indebidos. Por otra parte, una orientación exclusivamente permisiva, aun siendo menos limitante, podría fomentar una actitud de *laissez faire* y fomentar una suerte de «vamos a probar», un enfoque que podría impedir reflexiones necesarias para obtener una percepción oportuna y clara de los avances neurotecnológicos surgidos en la escena mundial (Giordano, Forsythe y Olds 2010; Sarewitz y Karras 2012). Así, creo que un equilibrio entre precaución y aserción sería el más adecuado, si no directamente necesario para alcanzar un enfoque neuroético efectivo (Giordano 2012a, 2016a). Para que este equilibrio sea posible, propongo una fase preparatoria cimentada en el compromiso de no frenar —y sí valorar de manera adecuada— los avances en la innovación y la aplicación de la neuroC/T; es decir, el «constructo 6-R» descrito en la Tabla III.



CONSTRUCTO 6-R

TABLA III

Responsabilidad por...

Realismo a la hora de evaluar la neurotecnología y las INELS

Rigor científico para una evaluación constante de los usos y efectos en la práctica

Receptividad ante los beneficios, cargas y efectos negativos

Revisión de la tecnología, el *marketing* y las instrucciones de uso

Regulación que sea flexible en función de los continuos cambios en la neuroC/T

Esta postura plantea preguntas sobre las dimensiones y el alcance del uso práctico de neurotecnologías particulares; es decir, las «seis preguntas abiertas». A la vez enmarca dichos usos en contextos y contingencias específicas relevantes a la hora de maximizar beneficios y mitigar las cargas y los riesgos que pueden correr pacientes y el público en general; es decir, el «concepto 6-C» (Giordano 2015a, 2015b, 2016a; Giordano, Casebeer y Sánchez 2014).

Las «seis preguntas abiertas» definen patrones de empleo, describen beneficios perseguidos e identifican cargas y riesgos en los que puede incurrir el uso de neuroC/T. Son las siguientes:

¿Qué enfoques neurotecnológicos se están considerando o proponiendo y cuáles son sus beneficios identificables, sus cargas potenciales, sus riesgos o sus posibles efectos negativos?

¿Por qué se están considerando enfoques neurotecnológicos concretos, por ejemplo, en función de si tienen o no capacidad real de influir en la patología, la cognición, la emoción o el comportamiento? ¿Se debe a la deficiencia/inefectividad de otros enfoques, etcétera?

¿Quién se beneficiará de la neuroC/T?; o sea, ¿qué individuos específicos, grupos...?

¿Cuándo se considerará o propondrá el uso de tipos concretos de neuroC/T; por ejemplo, dentro de un protocolo clínico, bajo determinadas condiciones laborales y contingencias...?

¿Dónde se utilizará/proporcionará neuroC/T?; a saber, ¿en entornos clínicos, paraclínicos/laborales u otros?

¿Cuáles serán los programas de ayudas que se usarán y/o desarrollarán para asegurar tanto la provisión de neuroC/T como la continuidad de la investigación y la atención necesarias para una aplicación práctica de la neurociencia en condiciones de seguridad?

Estas preguntas deberán enmarcarse en los «seis conceptos C», desarrollados a partir de los trabajos de Casebeer (2013) para describir y examinar el desarrollo y uso de la neuroC/T en relación con:

Capacidades de la ciencia y tecnología en cuestión.

Consecuencias de la investigación o del uso práctico de los conocimientos y herramientas neurocientíficos.

Carácter tanto de la investigación como de la manera en la que el uso o los usos de la neuroC/T pueden afectar la identidad y la ontología de individuos y comunidades.

Continuidad del tratamiento clínico y la investigación como algo necesario para abordar y gestionar todos los efectos que se desprendan del uso de determinadas técnicas y tecnologías neurocientíficas.

Consentimiento relativo a la naturaleza, al alcance y a la disponibilidad de la información necesaria para asegurar la participación voluntaria en estudios clínicos y tratamientos con neuroC/T.

Contextos en los que puedan utilizarse tipos específicos de neuroC/T dentro de las distintas situaciones, instituciones y contingencias socioculturales que puedan afectar las variables anteriormente expuestas.



«Mientras nuestro cerebro sea un arcano, el universo, reflejo de su estructura, será también un misterio.»

SANTIAGO RAMÓN Y CAJAL (1852-1934)

Médico español, pionero de la neurociencia y premio Nobel de Medicina en 1906. *Chácharas de café* (1920)

Corte transversal semiesquemático de una circunvolución cerebelosa de mamífero. Dibujo de Santiago Ramón y Cajal, c. 1888



VALORAR LAS INELS ACTUALES Y FUTURAS

Es posible usar los argumentos de la literatura científica revisada por pares, medios públicos y foros, así como las tendencias comerciales tanto para cartografiar las principales INELS que genera la neuroC/T en contextos globales como para identificar las cuestiones preocupantes y de importancia (Consejo de Nuffield sobre Bioética 2013; Schnabel, Kohls, Sheppard y Giordano 2014). Una investigación así puede revelar el alcance y las interacciones de diversos ámbitos de efecto e influencia, y emplearse tanto para modelar los de las INELS surgidos de los distintos usos de la neuroC/T como para desarrollar patrones de interacción e interconexiones entre nuevos avances científicos y tecnológicos y los distintos ámbitos de la sociedad en los que puedan surgir e influir cuestiones éticas y legales.

En algunos casos, los patrones de uso(s) y los efectos de la neuroC/T serán completamente nuevos. Cuando así sea, puede ser necesario un enfoque más casuístico, que proporcione ejemplos previos que sirvan como referencias a partir de las cuales proyectar trayectorias posibles a corto y medio plazo. Con este fin en mente, hemos propuesto un método al que nos referimos (en inglés) con el acrónimo *HISTORY*, que contempla: la trayectoria histórica (*historicity*) y las implicaciones de la C/T (*implications*), la defensa de los derechos de los ciudadanos (*ombudsmanship*) y la orientación responsable (*responsible yeomanship*) en la resolución práctica y el enfoque de cuestiones éticas, legales y sociales, así como en los problemas generados por la C/T en contextos específicos (Giordano y Benedikter 2013; Tractenberg, Fitzgerald y Giordano 2014).

El análisis histórico de la influencia y las implicaciones de la C/T es un paso importante hacia la defensa de los derechos de los ciudadanos, y pasa por revelar y describir problemas éticos, legales y sociales provocados por la C/T en sus aplicaciones dentro de un entorno social determinado. De aquí surge la ciudadanía responsable: la identificación y el análisis de las capacidades y limitaciones reales de la neuroC/T, y las necesidades, los valores y principios morales de los individuos y las comunidades que usarán y, por tanto, experimentarán los efectos de dichas herramientas y técnicas.

Ya sea valorándolo mediante la descripción de los progresos existentes o mediante la evaluación de tendencias previas relevantes, la simulación de los efectos sociales de la neuroC/T suele implicar extrapolaciones de conceptos a sus resultados. Sin embargo, hemos demostrado que visualizar los avances y la influencia de la neuroC/T con un horizonte de futuro superior a los diez o quince años se hace difícil debido al crecimiento fractal de la C/T, a la interacción o interacciones recíprocas entre la C/T y las fuerzas sociales y a la diversidad resultante de efectos potenciales, conocidos y desconocidos (Schnabel, Kohls, Shepard y Giordano 2014). Esto es especialmente evidente para las INELS generadas por el uso dual de la neuroC/T, dados los escenarios económicos y políticos mundiales actuales, que afectan a los programas de seguridad nacional y al empleo de la biotecnología en operaciones militares (Abney, Lin y Mehlman 2014; Dando 2015; Giordano 2014, 2016a; Giordano, Forsythe y Olds 2010; Tabery 2014).

Para hacer posible la preparación para las circunstancias y los efectos derivados del desarrollo de avances de neuroC/T y su articulación, una vez que se cumplan los intervalos de tiempo mencionados (de diez o quince años), pueden ser útiles —si no esenciales— técnicas de planificación estratégica. La planificación estratégica aplica un enfoque multidisciplinar



y polifacético a la evaluación de las necesidades estratégicas, establece los requerimientos para hacer frente a esas necesidades y selecciona aquellas capacidades idóneas para los requerimientos operativos con este horizonte temporal determinado (diez o quince años). Este proceso implica analizar limitaciones de recursos, entornos cambiantes y riesgos (como la incertidumbre o los resultados negativos asociados a disparidad entre factores esenciales) para discernir variables claves y optimizar así la visualización y planificación de las INELS y sus efectos en contextos socioculturales dados (Giordano 2016a). Si se hace en el marco de un enfoque integrador de la evaluación neuroC/T, la adopción y adaptación de métodos de planificación existentes podría proporcionar un acercamiento válido y valioso a la neuroC/T y a las INELS. Dichos métodos pueden hacer posible una orientación más flexible y sensible a la predicción y descripción de escenarios probables de salud pública, socioeconómicos, políticos y militares que pueden determinar si progresará la neuroC/T, y de qué manera y en qué aspectos dentro de las ecologías internacionales; definir INELS claves que surjan en esas trayectorias y escenarios, y así influir en las directrices futuras y en la gobernanza a medio plazo de la neuroC/T. En la actualidad estamos desarrollando protocolos de modelamiento y simulación de juegos que identificarán dominios y trazarán trayectorias de efectos generados por usos y aplicaciones de la neuroC/T con distintos horizontes temporales y bajo condiciones diversas (Schnabel, Kohls, Shepard y Giordano 2014).

LA NEUROC/T EN LA PRÁCTICA

Recomendaciones recientes, como las ofrecidas por la Comisión Presidencial para el Estudio de Cuestiones Bioéticas (2015) y directrices y regulaciones federales, como ICH E-6, ISO 14155, 2011 y 21 CFR 812.43, proporcionan valiosos parámetros para la investigación y la utilización de la neuroC/T. Sin embargo, aún falta una serie de desafíos neuroéticos, como el alcance, el ritmo y la distribución de la neuroC/T y la demanda de un uso más extenso de sus técnicas (Giordano y Shook 2015). Sin duda, la neuroC/T puede afectar, afectará y se verá afectada por las necesidades, los valores y puntos de vista socioculturales. Aunque algunos valores y necesidades pueden ser comunes a muchas, si no a todas las culturas, otros diferirán.

Así, los preceptos y principios éticos actuales, aunque viables —y valiosos— en algunos casos, probablemente no bastarán ni serán adecuados para hacer frente y guiar las situaciones y contingencias específicas planteadas por los distintos contextos socioculturales en los que se está desarrollando o empleando la neuroC/T (Levy 2010; Giordano 2010; Giordano y Benedikter 2012a, 2012b; Shook y Giordano 2014). Creemos que la internacionalización de la neuroC/T exige el abandono de la ética y la filosofía tradicionales y exclusivamente occidentales. Una neuroética contemporánea solo puede ser pertinente y aplicable en el siglo XXI si tiene en cuenta las contingencias y exigencias socioculturales de las distintas partes interesadas. Para asegurar esto, abogamos por un enfoque cosmopolita que pueda articularse dentro de determinados contextos comunitarios mediante la adaptación de ciertos principios existentes y el desarrollo de otros nuevos. Aunque todavía hipotético y tentativo, creemos que este método, si bien no está exento de problemas como las tensiones que puedan surgir de la adopción intercomunitaria de la neuroC/T, sí resulta prometedor como paradigma metodológico de una neuroética «globalizable» (Lanzilao *et al.* 2013).



El enfoque y la orientación de la investigación y uso de neuroC/T requerirán esfuerzos dedicados a la formación de grupos de trabajo, debate continuado, formulación de métodos y protocolos y establecimiento de estándares y directrices que sean relevantes en el ámbito nacional e internacional, además de viables.

Hemos propuesto que un porcentaje concreto de los presupuestos generales de iniciativas nacionales para la investigación del cerebro se destine a abordar las INELS generadas por los procedimientos científicos atendiendo a peticiones concretas de propuestas. Además, una inversión equivalente de los sectores privado y empresarial sería clave para establecer proyectos INELS bien concebidos que reflejen y estén vinculados a los objetivos, el rango de actuación y el tipo de actividad de estas empresas en el campo de la investigación neurotecnológica y de su aplicación (Avram y Giordano 2014; Lanzilao *et al.* 2013).

Trabajando en colaboración, los esfuerzos de entidades federales y privadas, es decir, empresariales y filantrópicas, podrían sumar financiación para apoyar la formación de una red de centros de neuroética, tanto dentro como fuera de círculos académicos, que harían las veces de recursos interactivos (y en algunos casos independientes de la Administración) que permitirían a estudiosos y clínicos multidisciplinares centrarse en las INELS más adecuadas para importantes áreas de la inversión, desarrollo y articulación de la neuroC/T y que afectan a distintos sectores de la sociedad, como por ejemplo medicina, vida pública, ejército, etcétera. Además, será de vital importancia educar a profesionales en diferentes campos, incluidas las ciencias, las humanidades, la ley y la política, así como al público general respecto a lo que puede y no puede conseguir la neuroC/T a la vista del nivel actual y del curso de las investigaciones, el desarrollo y el uso que hay ahora mismo planeados, y dadas también las INELS más susceptibles de surgir de un empleo realista de la neuroC/T. De hecho, el aprendizaje debe preceder al cambio positivo y, de no producirse, dicho cambio puede despertar esperanzas falsas o temores y dar pie a acciones mal dirigidas, a menudo con consecuencias nefastas.



CONCLUSIÓN

He afirmado que sería imprudente, o directamente irresponsable, «ignorar el peso de la información neurocientífica, su impacto en la sociedad, las situaciones éticas y legales resultantes y la necesidad de tomar decisiones de índole moral sobre las maneras de emplear



la neurociencia y sus herramientas» (Giordano 2011). En consecuencia, he defendido en repetidas ocasiones que no haya «neuroC/T nueva sin neuroética» (Giordano 2015c). Pero también sostengo que toda deliberación neuroética y legal debe estar firmemente basada en la realidad de las ciencias del cerebro y en sus capacidades, limitaciones y usos reales; es decir, «que no haya neuroética sin neurociencia».

El debate y las explicaciones éticas pueden hacer mucho ruido, pero serán discursos vacíos a no ser que exista un esfuerzo explícito por dotar de contenido a las directrices y políticas (Giordano 2015c; Giordano y Shook 2015). Sin embargo, el ritmo del desarrollo científico y tecnológico a menudo supera al de la formulación de las políticas. Esto por un lado podría verse como la oportunidad de mantener un discurso profundo y abierto sobre ciencia y tecnología y sus repercusiones y efectos en la sociedad; por otro puede hacer pensar en la formulación de políticas reguladoras como algo retrospectivo y reactivo antes que reflexivo y proactivo. Así, para cuando se introducen políticas reguladoras, se puede estar en realidad implementando una gobernanza de efectos obsoletos y una ciencia y una tecnología que ya se han quedado «viejas» (Swetnam *et al.* 2013).

Por tanto, las directrices y las medidas reguladoras han de ser dotadas de contenido en el momento oportuno y deben conservar una relativa flexibilidad para hacer frente a contingencias desencadenadas por los continuos avances en neuroC/T y en los ámbitos sociales en los que esta ciencia se articula. Es inevitable que la neuroC/T sea, y cada vez lo será más, una realidad prominente y una fuerza poderosa. Cómo se manifestarán esta fuerza y este poder en el futuro depende de los enfoques y la reflexión neuroéticos actuales, así como de la adopción prudente de directrices y medidas reguladoras que configuren y orienten el uso de la neuroC/T en el siglo XXI.

«Lo que quisiéramos hacer deberíamos hacerlo en el acto de quererlo».
William Shakespeare, *Hamlet*, acto IV, escena VII.*

AGRADECIMIENTOS

Este capítulo es una adaptación de las obras del autor: «Neuroethics: Traditions, Tasks and Values», en *Human Prospect*, vol. 1, n.º 1, 2011, pp. 2-8; «The human prospect(s) of neuroscience and neurotechnology: Domains of influence and the necessity—and questions—of neuroethics», en *Human Prospect*, vol. 4, n.º 1, 2014, pp. 1-18; y «Toward an operational neuroethical risk analysis and mitigation paradigm for emerging neuroscience and technology (neuroS/T)», en *Exp Neurol*, 2016. Este trabajo ha sido financiado en parte por la beca William H. and Ruth Crane Schaefer de la Clark Foundation y por el Lawrence Livermore National Laboratory. El autor es miembro electo de la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzados de Defensa de Estados Unidos (DARPA). Las opiniones expresadas en este capítulo son las del autor y no reflejan necesariamente las de la DARPA, el Departamento de Defensa o el Departamento de Energía de Estados Unidos.

*Traducción de
Luis Astrana Marín,
Madrid, Aguilar,
1982 (N. del T.).



BIBLIOGRAFÍA

- Abney, K., Lin, P. y Mehlman, M., «Military Neuroenhancement and Risk Assessment», en Giordano J. (ed.), *Neurotechnology in National Security and Defense: Practical Considerations, Neuroethic Concerns*, Boca Ratón, Florida, CRC Press, 2014, pp. 239-248.
- Anderson, M. A., Fitz, N. y Howlader, D., «Neurotechnology Research and the World Stage: Ethics, Biopower and Policy», en Giordano, J. (ed.), *Neurotechnology: Premises, Potential and Problems*, Boca Ratón, Florida, CRC Press, 2012b, pp. 287-300.
- Avram, M. y Giordano, J., «Neuroethics: Some Things Old, some Things New, some Things Borrowed... and To Do», en *AJOB Neuroscience*, vol. 5, n.º 4, 2014, pp. 1-3.
- Casebeer, W., «Ethical Issues Associated with the BRAIN Initiative and Ongoing Work in Neuroscience», presentado en la XIV Reunión de la Comisión Presidencial para el Estudio de Asuntos Bioéticos, Filadelfia, Pensilvania, 20 de agosto de 2013.
- Consejo de Nuffield sobre Bioética, *Novel Neurotechnologies: Intervening in the Brain*, Londres, Nuffield Council on Bioethics Reports, 2013.
- Comisión Presidencial para el Estudio de Asuntos Bioéticos, *Gray Matters. Topics at the Intersection of Neuroscience, Ethics, and Society*, vol. 2, Washington D. C., Presidential Commission for the Study of Bioethical Issues Press, 2015.
- Dando, M., *Neuroscience and the Future of Chemical-Biological Weapons*, Nueva York, Palgrave Macmillan, 2015.
- Gini, A. y Giordano, J., «The Human Condition and Strivings to Flourish», en Giordano, J. y Gordijn, B. (eds.), *Scientific and Philosophical Perspectives in Neuroethics*, Cambridge, Cambridge University Press, 2010, pp. 343-354.
- Gini, A., Rossi, P. J. y Giordano, J., «Considering Enhancement and Treatment: On the Need to Regard Contingency and Develop Dialectic Evaluation», en *AJOB Neuroscience*, vol. 1, n.º 1, 2010, pp. 25-27.
- Giordano, J., «The Mechanistic Paradox: The Relationship of Science, Technology, Ethics and Policy», en *Synesis: A Journal of Science, Technology, Ethics, and Policy*, vol. 1, n.º 1, pp. G1-4, 2010.
- Giordano, J., «Neuroethics: Two Interacting Traditions as a Viable Meta-ethics?», en *AJOB Neuroscience*, vol. 3, n.º 1, 2011, pp. 23-25.
- Giordano, J., «Neurotechnology as Demiurgical Force: Avoiding Icarus' Folly», en Giordano, J. (ed.), *Neurotechnology: Premises, Potential and Problems*, Boca Ratón, Florida, CRC Press, 2012b, pp. 1-14.
- Giordano, J. (ed.), *Neurotechnology: Premises, Potential and Problems*, Boca Ratón, Florida, CRC Press, 2012b.
- Giordano, J., «The Human Prospect(s) of Neuroscience and Neurotechnology: Domains of Influence and the Necessity—and questions—of Neuroethics», en *Human Prospect*, vol. 4, n.º 1, pp. 1-18, 2014.
- Giordano, J., «A Preparatory Neuroethical Approach to Assessing Developments in Neurotechnology», en *AMA J Ethics*, vol. 17, n.º 1, 2015a, pp. 56-61.
- Giordano, J., «Conditions to the Consent for Use of Neurotechnology: A Preparatory Neuroethical Approach to Risk Assessment and Reduction», en *AJOB Neuroscience*, vol. 6, n.º 4, 2015b, pp. 12-13.
- Giordano, J., «No New Neuroscience without Neuroethics», BioMed Central Blog Network, 2015c. <http://blogs.biomedcentral.com/on-health/2015/07/08/no-newneuroscience-without-neuroethics>
- Giordano, J., «Toward an Operational Neuroethical Risk Analysis and Mitigation Paradigm for Emerging Neuroscience and Technology (neuroS/T)», en *Exp Neurol*, 2016a.
- Giordano, J., «The Neuroweapons Threat», en *Bull Atomic Sci*, vol. 72, n.º 3, 2016b, pp. 1-4.
- Giordano, J. y R. Benedikter., «An Early—and Necessary—Flight of the Owl of Minerva: Neuroscience, Neurotechnology, Human Sociocultural Boundaries, and the Importance of Neuroethics», en *J Evolution and Technol*, vol. 22, n.º 1, 2012a, pp. 14-25.
- Giordano, J. y Benedikter, R., «Neurotechnology, Culture and the Need for a Cosmopolitan Neuroethics», en Giordano, J. (ed.), *Neurotechnology: Premises, Potential and Problems*, Boca Ratón, Florida, CRC Press, 2012b, pp. 233-242.
- Giordano, J. y Benedikter, R., «HISTORY: Historicity and Implications of Science and Technology, Ombudsmanship, Responsibility and Yeomanry: A Methodic Approach to Neuroethics», ponencia presentada en la V Reunión Anual de la Sociedad Internacional de Neuroética, San Diego, California, 15 de noviembre de 2013.
- Giordano, J., Casebeer, W. y Sanchez, J., «Assessing and Managing Risks in Systems Neuroscience Research and its Translation: A Preparatory Neuroethical Approach», ponencia presentada en la VI Reunión Anual de la Sociedad Internacional de Neuroética, Washington D. C., 13 y 14 de noviembre de 2014.
- Giordano, J., Forsythe, C. y Olds, J., «Neuroscience, Neurotechnology and National Security: The Need for Preparedness and an Ethics of Responsible Action», en *AJOB Neuroscience*, vol. 1, n.º 2, 2010, pp. 1-3.
- Giordano, J. y Olds, J., «On the Interfluence of Neuroscience, Neuroethics and Legal and Social Issues: The Need for (N)ELSI», en *AJOB Neuroscience*, vol. 2, n.º 2, 2010, pp. 13-15.
- Giordano, J. y Shook, J., «Minding Brain Science in Medicine: On the Need for Neuroethical Engagement for Guidance of Neuroscience in Clinical Contexts», en *Ethics Biol Engineer Med*, vol. 6, n.º 1-2, 2015, pp. 37-42.
- Hughes, J. J., «Human Enhancement and the Emergent Technopolitics of the 21st Century», en Bainbridge W. S. y Roco M. C. (eds.), *Managing Nano-Bio-Info-Cogno Innovations*, Nueva York, Springer, 2006, pp. 285-307.



- Lanzilao, E., Shook, J., Benedikter, R. y Giordano, J., «Advancing Neuroscience on the 21st Century World Stage: The Need for— and Proposed Structure of— an Internationally Relevant Neuroethics», en *Ethics Biol Engineer Med*, vol. 4, n.º 3, 2013, pp. 211-229.
- Levy, N., «Neuroethics: A New Way of Doing Ethics», en *AJOB Neuroscience*, vol. 2, n.º 2, 2010, pp. 3-9.
- Lynch, Z. y McCann, C. M., «Neurotech Clusters 2010–2020: Leading Regions in the Global Neurotechnology Industry 2010-2020», en *NeuroInsights Report*, San Francisco, California, 2010.
- Martin, A., Becker, K., Darragh, M. y Giordano, J., «A Four-part Bibliography of Neuroethics: Part 3: The ethics of neuroscience», en *Phil Ethics Humanities in Med*, vol. 11, n.º 3, 2016.
- NeuroInsights, página web, 2015. <http://www.neuroinsights.com/neurotech-2015>
- Sarewitz, D. y Karras, T. H., «Policy Implications of Technology for Cognitive Enhancement», en Giordano, J. (ed.), *Neurotechnology: Premises, Potential and Problems*, Boca Ratón, Florida, CRC Press, 2012b, pp. 267-286.
- Schnabel, M., Kohls, N. B., Shepard, B. y Giordano, J., «New Paths Through Identified Fields: Mapping Domains of Neuroethico-legal and Social Issues of Global Use of Neurotechnology by Quantitative Modeling and Probability Plotting within a Health Promotions' Paradigm», ponencia presentada en la VI Reunión Anual de la Sociedad Internacional de Neuroética, Washington D. C., 13 y 14 de noviembre de 2014.
- Shakespeare, W., *Hamlet*, Nueva York, Penguin Press, 4.7, 1965, pp. 118-119.
- Shook, J. R. y Giordano, J., «A Principled, Cosmopolitan Neuroethics: Considerations for International Relevance», en *Phil Ethics Humanities in Med*, vol. 9, n.º 1, 2014.
- Shook, J. R. y Giordano, J., «Neuroethics beyond Normal. Performance Enablement and Selftransformative Technologies», en *Camb Q Healthcare Ethics— Neuroethics Now*, vol. 25, 2016, pp. 121-140.
- Swetnam, M., McBride, D., Herzfeld, C., Barnett, J., Schiller, K., Gallington, D., Retelle, J., Siegrist, D., Buss, J. y Giordano, J., *Neurotechnology Futures Study: A Roadmap for the Development of Neuroscience and Neurotechnology That Will Lead to the Economic Revolution of the 21st Century*, Arlington, Virginia, Potomac Institute Press, 2013.
- Tabery, J., «Can (and Should) We Regulate Neurosecurity? Lessons from History», en Giordano J. (ed.), *Neurotechnology in National Security and Defense: Practical Considerations, Neuroethical Concerns*, Boca Ratón, Florida, CRC Press, 2014, pp. 249-258.
- Tractenberg, R. E., Fitzgerald, K. T. y Giordano, J., «Engaging Neuroethical Issues Generated by the Use of Neurotechnology in National Security and Defense: Toward Process, Methods and Paradigm», en Giordano, J. (ed.), *Neurotechnology in National Security and Defense: Practical Considerations, Neuroethical Concerns*, Boca Ratón, Florida, CRC Press, 2014, pp. 259-278.



Hiperhistoria, la aparición de los sistemas multiagente (SMA) y el diseño de una infraética

LUCIANO FLORIDI

Imagen de apertura:
Público de una videoconferencia
del fundador de WikiLeaks, Julian
Assange, en el salón de actos del Centro
Internacional de Estudios Superiores de
Comunicación para América Latina en
Quito (CIESPAL) el 23 de junio de 2016



Luciano Floridi

Oxford Internet Institute, Oxford University, Reino Unido

Luciano Floridi es profesor de Filosofía y Ética de la Información en la Universidad de Oxford. Entre sus últimos libros, todos publicados por Oxford University Press, destacan: *The Fourth Revolution. How the Infosphere is Reshaping Human Reality* (2014), *The Ethics of Information* (2013) y *The Philosophy of Information* (2011). Es miembro del comité ético asesor sobre las dimensiones éticas de la protección de datos de Estados Unidos, del grupo de trabajo sobre gobernanza de datos de la Royal Society y la British Academy, del comité asesor de Google sobre «el derecho a ser olvidado» y presidente del comité ético asesor del marco europeo de información médica.

La revolución copernicana nos desplazó del centro del universo. La revolución darwinista del centro del reino biológico. Y la revolución freudiana del centro de nuestras vidas mentales. Hoy, la informática y las tecnologías de la información y las comunicaciones (TIC) están causando una cuarta revolución, cambiando radicalmente una vez más nuestra concepción de quiénes somos y cuestionando nuestra «centralidad excepcional». No estamos en el centro de la infoesfera. No somos entes autónomos, sino agentes de información interconectados que compartimos con otros agentes y con pequeños artefactos un entorno global hecho, en última instancia, de información. Ahora que ha cambiado nuestra visión de nosotros mismos y de nuestro mundo, ¿las TIC nos van a empoderar o nos van a constreñir? La respuesta reside en un enfoque ecológico y ético que abarque las realidades naturales y artificiales. Debemos encontrar un enfoque del medioambiente que afronte con éxito los nuevos problemas generados por esta cuarta revolución.

HIPERHISTORIA

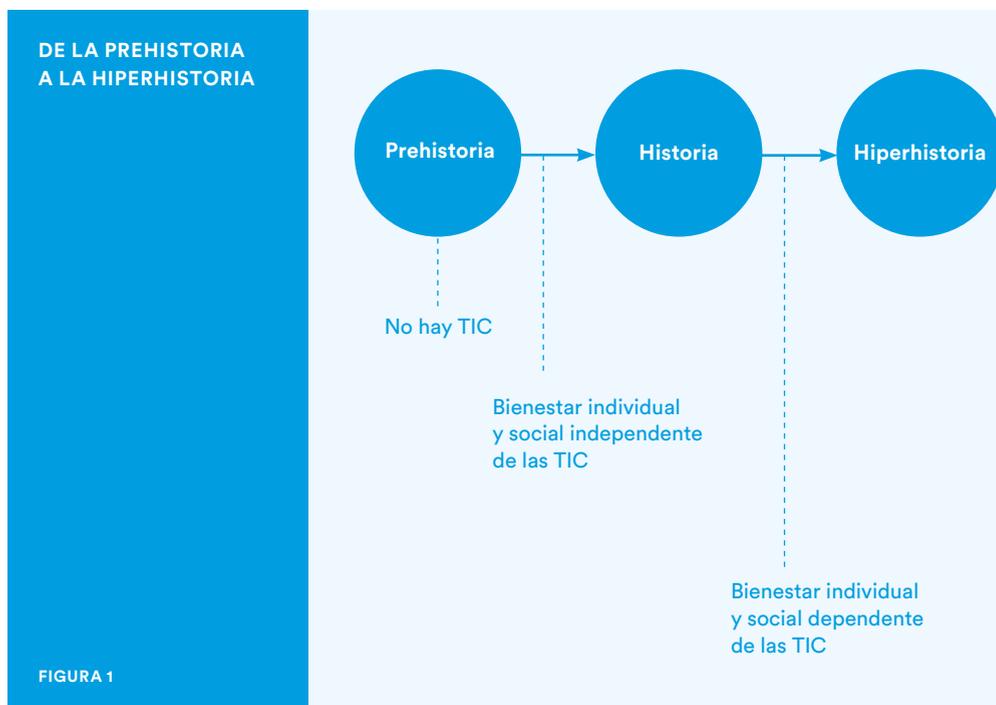
Hoy hay más personas vivas que nunca en la historia de la evolución humana. Y cada vez vivimos más¹ y mejor². En gran medida se lo debemos a nuestras tecnologías, al menos en la medida en que las desarrollamos y usamos de una manera inteligente, pacífica y sostenible.

A veces olvidamos cuánto les debemos al sílex y a la rueda, al fuego y al arado, al motor de explosión y a los satélites. Tomamos conciencia de esta profunda deuda tecnológica cuando dividimos la historia humana en prehistoria e historia. Ese significativo umbral está ahí para recordarnos la invención y el desarrollo de las TIC, es lo que marca la diferencia entre lo que fuimos y lo que somos. Hasta que las lecciones aprendidas por generaciones anteriores no empezaron a evolucionar de modo lamarckiano más que darwiniano, la humanidad no entró en la historia.

La historia ha durado seis mil años desde que se inició con la invención de la escritura en el cuarto milenio antes de Cristo. Durante este periodo relativamente corto, las TIC proporcionaron la infraestructura para registrar y transmitir que ha hecho posible el perfeccionamiento de otras tecnologías, con la consecuencia directa de aumentar nuestra dependencia en más y más capas de tecnologías. Las TIC maduraron en los escasos siglos transcurridos entre Gutenberg y Turing. Hoy están experimentando una transformación



radical que podría resultar igual de decisiva, ya que hemos comenzado a trazar un nuevo umbral entre la historia y la nueva era, a la que podríamos llamar acertadamente hiperhistoria (véase Figura 1). Me explico.



Prehistoria (es decir, el periodo previo a los testimonios escritos) e historia funcionan como adverbios: nos hablan de cómo vive la gente, no de dónde o cuándo. Desde esta perspectiva, las sociedades humanas habrían tenido tres edades definidas por sus modos de vida. Según informes acerca de un número no especificado de tribus no contactadas en la región amazónica, algunas sociedades continúan viviendo en la prehistoria, sin TIC o al menos sin testimonios escritos. Si un día estas tribus desaparecen, se habrá cerrado el primer capítulo del libro de nuestra evolución. Hoy la inmensa mayoría de los individuos siguen viviendo históricamente, en sociedades que dependen de las TIC para registrar y transmitir datos de todo tipo. En estas sociedades históricas, las TIC aún no han ocupado el lugar de otras tecnologías, sobre todo las relativas a la energía, en términos de importancia vital. Luego, hay quienes viven ya en la hiperhistoria, en sociedades o entornos en los que las TIC y sus prestaciones de procesamiento de datos son la condición necesaria para el mantenimiento y desarrollo del bienestar social, la salud personal y el florecimiento intelectual. La naturaleza de los enfrentamientos es la triste prueba de la fiabilidad de esta interpretación tripartita de la evolución humana. Un ciberataque a los sistemas de información solo supone una amenaza fatal para una sociedad que vive hiperhistóricamente. Solo los que viven de los datos pueden morir a causa de ellos.³



Para resumir, la evolución humana podría visualizarse como un cohete de tres fases: en la prehistoria no hay TIC; en la historia hay TIC que registran y transmiten datos, pero las sociedades humanas dependen sobre todo de otro tipo de tecnologías que afectan a los recursos primarios y la energía; en la hiperhistoria hay TIC, que registran, transmiten, pero sobre todo procesan datos de forma cada vez más autónoma, y las sociedades humanas dependen de ellas y de la información como recurso fundamental. El valor añadido llega cuando pasamos de relacionarnos con las TIC a depender de ellas. Ya no podemos desenchufar nuestro mundo de las TIC sin apagarlo totalmente.

Si todo esto es correcto, aunque sea aproximadamente, la salida de la era histórica representa uno de los pasos más importantes en la historia de la humanidad. Desde luego, abre un amplísimo horizonte de oportunidades, aunque también de retos y dificultades, todos esencialmente dependientes de los poderes de registro, tramitación y proceso de las TIC. La bioquímica sintética, la neurociencia, el internet de las cosas, las exploraciones planetarias no tripuladas, las tecnologías verdes, los nuevos tratamientos médicos, los medios sociales, los juegos digitales, aplicaciones agrícolas y financieras, el desarrollo económico y de la industria energética, nuestras actividades de descubrimiento, invención, diseño, control, educación, trabajo, relaciones sociales, ocio, atención médica, seguridad, negocios, etcétera, no solo no serían factibles, resultarían impensables en un contexto histórico puramente mecánico.

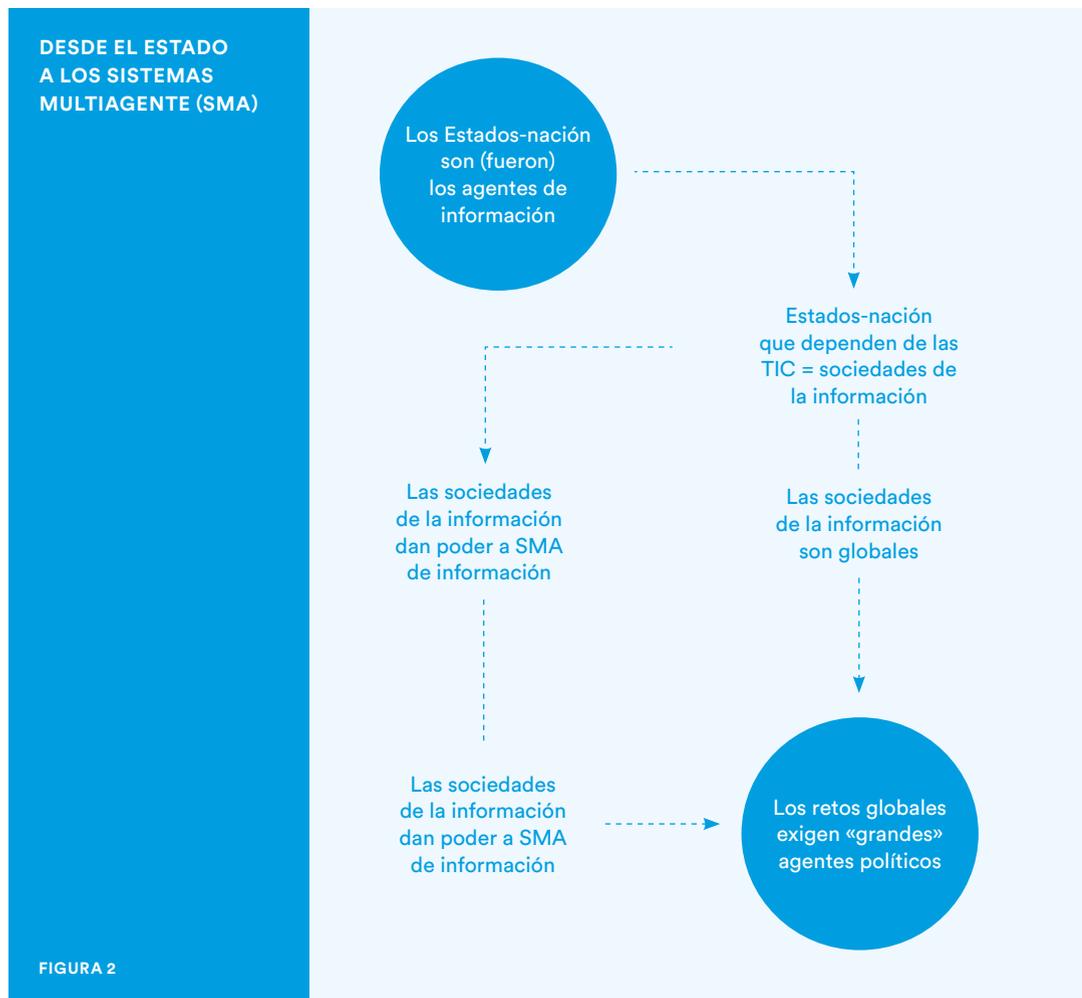
Hoy en día la naturaleza de todas estas acciones es hiperhistórica. Por consiguiente, estamos presenciando la definición de un escenario macroscópico en el que la hiperhistoria y la re-ontologización de la infoesfera en la que vivimos están poniendo distancia muy rápidamente entre las generaciones futuras y la nuestra.

Esto no quiere decir, por supuesto, que no exista una continuidad, hacia atrás y hacia delante. Hacia atrás porque con frecuencia, cuanto más profunda es una transformación, más hondas raíces tienen sus causas. Esto se debe a que muchas fuerzas diferentes llevan mucho tiempo creando la presión necesaria para que puedan producirse cambios radicales de forma repentina, inesperada incluso. La rama del



árbol no la rompe el último copo de nieve. En nuestro caso, la historia es la que engendra la hiperhistoria. Sin el alfabeto no existiría el código ASCII. Hacia delante porque es bastante plausible que las sociedades históricas sobrevivan largo tiempo de un modo no muy distinto a las tribus amazónicas prehistóricas mencionadas anteriormente. A pesar de la globalización, las sociedades humanas no avanzan de forma uniforme, en etapas sincronizadas.

Esta perspectiva a largo plazo debería ayudarnos a explicar el lento y gradual proceso de apoptosis (por usar un concepto de la biología celular) política que estamos experimentando. La apoptosis (también llamada muerte celular programada) es una forma natural y normal de autodestrucción en la que una secuencia programada de acontecimientos lleva a la autoeliminación de las células. La apoptosis desempeña un papel crucial en el desarrollo y mantenimiento de la salud física. Podría considerarse un fenómeno dialéctico de renovación y servir, por ejemplo, para describir la evolución de los Estados-nación en sociedades de la información (véase Figura 2), del siguiente modo:





Simplificando mucho, este podría ser un esquema rápido de los últimos cuatrocientos años de historia política: la paz de Westfalia (1648) marcó el final de la Guerra Mundial Cero, constituida por la guerra de los Treinta Años, la guerra de Flandes y un largo periodo de otros conflictos durante el cual las potencias europeas y las partes del mundo que dominaban se masacraban entre sí por motivos económicos, políticos y religiosos. Los cristianos se enfrentaron unos a otros con impresionante violencia y horrores indescriptibles. El nuevo sistema que surgió en aquellos años, el llamado orden westfaliano, vio la madurez de los Estados soberanos y después de los Estados-nación tal y como los conocemos hoy en día, por ejemplo Francia. Pensemos en el intervalo transcurrido entre el último capítulo de *Los tres mosqueteros*, cuando D'Artagnan, Aramis, Porthos y Athos toman parte en el sitio de La Rochelle en 1628 a las órdenes del cardenal Richelieu, y el primer capítulo de *Veinte años después*, cuando vuelven a reunirse, bajo la regencia de Ana de Austria (1601-1666) y el gobierno del cardenal Mazarino (1602-1661). El Estado no se convirtió en un agente monolítico, monomaniaco y bien coordinado, en la clase de bestia (el Leviatán de Hobbes), o más bien de robot que una era mecánica posterior nos llevaría a imaginar. Eso nunca sucedió. Más bien fue creciendo hasta convertirse en la fuerza vinculante, en una red capaz de mantener unidos, influir y coordinar todos los diferentes agentes y conductas dentro de sus fronteras geográficas. Desde las primeras ciudades-Estado griegas, la ciudadanía se había abordado en términos de biología (padres, género, edad...). Ahora se ha vuelto más flexible (grados de ciudadanía) al conceptualizarse también en términos de estatus legal, como cuando en el Imperio romano adquirir la ciudadanía (una idea que no habría tenido significado en un contexto puramente biológico) venía acompañado de una serie de derechos.

Con el Estado moderno, la geografía empezó a desempeñar un papel igual de importante al mezclar ciudadanía con nacionalidad y lugar de nacimiento. En este sentido, la historia del pasaporte es esclarecedora. Como documento de identidad, se afirma que fue un invento de Enrique V de Inglaterra (1387-1422), siglos antes de que entrara en vigor el orden westfaliano. Sin embargo, el orden westfaliano fue el que hizo el pasaporte como lo entendemos hoy: un documento que da derecho a su poseedor no a viajar (puede ser también necesario un visado, por ejemplo) ni a protección en el extranjero, sino a volver (o recibir ayuda para hacerlo) al país que emitió el pasaporte. Metafóricamente, es como una banda elástica que sujeta al propietario a un punto geográfico, con independencia de la distancia recorrida y del tiempo que haya dedicado a viajar por otras tierras. Este documento se volvió cada vez más útil a medida que el punto

geográfico se definía mejor. El lector puede sorprenderse de saber que en Europa fue muy común viajar sin pasaporte hasta la Primera Guerra Mundial, cuando la presión por la seguridad y los medios tecnoburocráticos hicieron necesario desenmarañar y organizar todas esas bandas elásticas que viajaban en tren.

De vuelta al orden westfaliano, ahora los espacios físico y legal se solapan y están gobernados por potencias soberanas que ejercen el control mediante la fuerza física para imponer leyes y asegurarse el respeto dentro de las fronteras nacionales. Los mapas no sirven solo para viajar y hacer negocios, también responden a la necesidad interna de los países de controlar el propio territorio, y a la externa de determinar su lugar en el globo. Un recaudador de impuestos o un general del ejército analizan estas líneas con miradas muy distintas de las de los usuarios de Expedia de hoy en día. Porque los Estados soberanos funcionan como sistemas multiagente (SMA, de los que hablaremos más adelante) que pueden, por ejemplo, subir los impuestos dentro de sus fronteras y contraer deudas como entidades legales (de ahí el término actual «deuda soberana», bonos emitidos por un gobierno nacional en una divisa extranjera) y, por supuesto, disputarse fronteras.

Parte de la lucha política pasa de ser, no una mera tensión más o menos silenciosa entre diferentes componentes del SMA, por ejemplo clérigos contra aristócratas, sino un equilibrio explícitamente codificado entre los diferentes agentes que lo constituyen. En concreto, Montesquieu propone la clásica división de poderes del Estado que hoy damos por sentada. El SMA de Estado se organiza como una red de tres «pequeños mundos», un poder legislativo, uno ejecutivo y uno judicial, entre los cuales solo se permiten determinados canales de información. Hoy a esto podríamos llamarlo «Westfalia 2.0».

Con el orden westfaliano la historia moderna entra en la era del Estado, y el Estado se convierte en el agente de información, que legisla y controla (o al menos lo intenta), en la medida de lo posible, todos los medios tecnológicos implicados en el ciclo de vida de la información, incluyendo educación, censo, impuestos, registros policiales, leyes y normas, prensa e inteligencia. Ya entonces, muchas de las aventuras en las que se ve envuelto D'Artagnan proceden de alguna comunicación secreta. Así pues, el Estado acaba fomentando el desarrollo de las TIC como medio de ejercer y conservar el poder político, el control social y la fuerza legal, pero con ello también está socavando su propio futuro como único, o al



menos principal, agente de información. Como ya explicaré con más detalle, las TIC, al ser una de las fuerzas más influyentes que hicieron del Estado algo factible y después predominante como impulso histórico en la política, también contribuyeron a quitarle protagonismo en la vida social, política y económica del mundo, forzando a los modelos centralizados de gobierno a desplazarse hacia la gobernanza distribuida y la coordinación internacional y global. El Estado evolucionó cada vez más hacia una sociedad de la información, y con ello fue poco a poco perdiendo su papel de principal agente de información. A lo largo de los siglos ha pasado de ser concebido como el garante último y el defensor de una sociedad de *laissez-faire*, a un sistema de bienestar bismarckiano que debe velar por todos sus ciudadanos. Las dos guerras mundiales fueron también enfrentamientos entre Estados-nación que se resistían a dejarse coordinar e incluir dentro de SMA mayores. De las guerras nacieron SMA como la Sociedad de Naciones, el Banco Mundial, el Fondo Monetario Internacional, las Naciones Unidas, la Unión Europea, la OTAN, etcétera. Hoy sabemos que no podemos confiar en que la solución a los problemas globales, desde el medioambiente a la crisis financiera, desde la justicia social a los fundamentalismos religiosos, desde la paz a la situación sanitaria, provenga únicamente de los Estados-nación, ya que precisan de la participación y presencia de agentes globales. Sin embargo, en un mundo poswestfaliano (Linklater 1998), hay mucha incertidumbre acerca de los nuevos SMA que conforman el presente y el futuro de la humanidad.

Lo dicho hasta aquí nos proporciona un enfoque filosófico para interpretar el consenso de Washington, la última fase en la apoptosis política del Estado. John Williamson acuñó la expresión «consenso de Washington» en 1989 para referirse a una serie de diez recomendaciones políticas concretas que a su juicio constituían una estrategia estándar adoptada y promovida por instituciones con sede en Washington D. C., como el Departamento del Tesoro de Estados Unidos, el Fondo Monetario Internacional y el Banco Mundial, destinadas a países que atraviesan crisis económicas. Las políticas abarcaban la estabilización macroeconómica, la liberalización tanto del comercio como de la inversión y la expansión de las fuerzas del mercado dentro de la economía doméstica. En el último cuarto de siglo este tema ha suscitado un debate intenso y vivo acerca de si los diagnósticos son acertados y las fórmulas aceptables: ¿responde el consenso de Washington a un fenómeno histórico real? ¿Alcanza alguna vez sus objetivos? ¿No debería más bien interpretarse, a pesar de que la definición de Williamson, como la imposición de políticas neoliberales por parte de instituciones financieras internacionales con sede en Washington en países en dificultades, es bastante clara? Se trata de cuestiones importantes, pero lo que de verdad nos interesa aquí no es una evaluación hermenéutica, económica o normativa del consenso de Washington, sino el hecho de que la idea en sí, aun cuando solo sea una idea influyente, recoge un aspecto significativo de nuestra época hiperhistórica y poswestfaliana, ya que debemos considerar el consenso de Washington como una consecuencia lógica de la Conferencia Monetaria y Financiera de Naciones Unidas, también conocida como conferencia de Bretton Woods (Steil 2013). En esta reunión, celebrada en 1944, que congregó a 730 delegados de las 44 naciones aliadas en el hotel Mount Washington de Bretton Woods, Nuevo Hampshire, Estados Unidos, se reguló el orden monetario y financiero internacional al término de la Segunda Guerra Mundial. De ella nació el Banco Internacional para la Reconstrucción y el Desarrollo (que, junto con su rama dedicada a la concesión de créditos, la Asociación para





El embajador de Canadá, Lester B. Pearson, firma el acuerdo de la Conferencia Monetaria y Financiera de Naciones Unidas con el que se reguló el orden monetario y financiero internacional tras la Segunda Guerra Mundial. Hotel Mount Washington de Bretton Woods, Nuevo Hampshire, Estados Unidos, diciembre de 1945

el Desarrollo Internacional, forman lo que conocemos como Banco Mundial), el Acuerdo General sobre Tarifas y Comercio (que será sustituido por la Organización Mundial del Comercio en 1995) y el Fondo Monetario Internacional.

En definitiva, Bretton Woods confirmó la existencia oficial de una serie de SMA diferentes como fuerzas supranacionales o intergubernamentales que toman parte en la resolución de problemas políticos, sociales y económicos internacionales. Bretton Woods, y después el consenso de Washington, ponen de relieve que, después de la Segunda Guerra Mundial, se admite abiertamente el poder de organizaciones e instituciones (no solo las de Washington D. C.) que no eran Estados, sino SMA no gubernamentales, de influir activamente en los escenarios políticos y económicos internacionales, aplicando políticas globales a la resolución de problemas globales. El hecho en sí de que (con razón o sin ella) el consenso de Washington haya sido acusado de cometer grandes errores al pasar por alto las especificidades locales y las diferencias globales refuerza la opinión de que una serie de poderosos SMA son ahora los nuevos actores políticos en las globalizadas sociedades de la información.

Todo esto nos sirve para explicar por qué, en un mundo poswestfaliano (nacimiento del Estado-nación como agente moderno de información política) y posterior a Bretton Woods (nacimiento de SMA no estatales como actores hiperhistóricos en la economía y la política globales), uno de los principales retos al que nos enfrentamos es cómo diseñar el tipo adecuado de SMA que aproveche plenamente el progreso sociopolítico logrado en la historia moderna y a su vez solucione de manera eficaz nuevos problemas globales que socavan la herencia de ese progreso en la hiperhistoria.

Entre las muchas explicaciones a este giro de un orden histórico y westfaliano al dilema hiperhistórico posterior al consenso de Washington, en busca de un nuevo equilibrio, hay tres que merecen destacarse.

Primera: poder. Las TIC «democratizan» los datos y el poder de procesarlos y controlarlos, en el sentido de que ambos residen y se multiplican ahora en multitud de almacenes y fuentes de datos, creando, permitiendo y empoderando a un número potencialmente infinito de agentes no estatales, desde individuos a asociaciones y grupos, macroagentes como empresas multinacionales, organizaciones internacionales, intergubernamentales e incluso no gubernamentales, e instituciones supranacionales. El Estado ya no es el único agente en la arena política, y a veces ni siquiera el principal, y su información no prevalece ya sobre la de otros agentes informativos, en particular sobre los (grupos de) ciudadanos. El fenómeno está generando una nueva tensión entre poder y fuerza en la que el poder es informativo y se ejerce mediante la elaboración y distribución de normas, mientras que la fuerza es física, y se ejerce cuando el poder no consigue orientar la conducta de los agentes implicados y hay que obligar a que se cumplan las normas. Cuanto más dependientes de la información son los bienes físicos e incluso el dinero, más importante es el aspecto financiero del poder informativo que ejercen los SMA.

Segunda: geografía. Las TIC desterritorializan la experiencia humana. Han hecho que las fronteras regionales sean porosas o, en determinados casos, irrelevantes. También han creado, y están ampliando exponencialmente, regiones de la infoesfera en las que cada vez más agentes (no solo humanos, véase Floridi 2013) operan y pasan más tiempo en la experiencia *onlife* (un nuevo espacio donde la frontera entre lo *online* y lo *offline* se ha borrado). Estas regiones son, por definición, no estatales, lo que está creando una nueva tensión entre la



geopolítica, que es global y no territorial, y los Estados-nación, que siguen definiendo su identidad y legitimidad políticas en términos de unidad territorial soberana, como países.

Tercera: organización. Las TIC fluidifican la topología de la política. No se limitan a permitir, sino que promueven (mediante la gestión y el empoderamiento) la agilidad, la temporalidad y la agregación, disgregación y reagregación oportunas de grupos distribuidos «bajo demanda», alrededor de intereses compartidos, superando las viejas y rígidas limitaciones que representan las clases sociales, los partidos políticos, las características étnicas, las barreras lingüísticas, las barreras físicas, etcétera. Esto genera nuevas tensiones entre el Estado-nación, que todavía se considera una importante entidad organizativa, aunque ya no tan rígida, dado que va transformándose cada vez más en un SMA muy flexible (volveré más adelante sobre este punto), y una variedad de organizaciones no estatales igualmente poderosas, incluso a veces más poderosas y políticamente influyentes (con respecto al viejo Estado-nación), los otros SMA en el lote. El terrorismo, por ejemplo, ya no es un mero asunto interno, como lo fueron en su día ciertas formas de terrorismo en el País Vasco, Alemania, Italia o Irlanda del Norte, sino una confrontación internacional con un SMA, como Al-Qaeda, la tristemente conocida organización islamista militante global.

Por eso se ha reformulado el debate sobre democracia directa. Solíamos pensar que se trataba de una nueva forma en que el Estado-nación podía reorganizarse de manera interna, mediante el diseño de normas y gestionando los medios para promover modalidades de democracia en las que los ciudadanos puedan proponer y votar iniciativas políticas directamente y casi en tiempo real. Creíamos que las formas de democracia directa eran opciones complementarias a las modalidades de democracia representativa. Iba a ser un mundo en el que «la política siempre estaría presente». La realidad es que la democracia directa se ha convertido en una democracia mediatizada por las comunicaciones, es decir, por nuevos medios sociales de comunicación e información. En estas democracias digitales, los SMA (entendidos como grupos distribuidos, temporal y puntualmente, y reunidos alrededor de intereses comunes) se han multiplicado y convertido en fuentes de influencia externa para los Estados-nación. Los ciudadanos votan a sus representantes, pero influyen en ellos mediante encuestas de opinión en tiempo real. La construcción de consensos se ha convertido en una preocupación constante que se basa en información sincrónica.

Por las tres razones anteriormente expuestas (poder, geografía y organización), la posición única del Estado histórico como el agente informativo está siendo socavada desde abajo y suprimida desde arriba por el auge de los SMA que tienen los datos, el poder (y a veces hasta la fuerza, como en los muy distintos casos de la ONU, las amenazas de ciberataques o los ataques terroristas), el espacio y la flexibilidad organizativa para erosionar la influencia política de los Estados modernos, apropiarse de (parte de) su autoridad y, a largo plazo, convertirlos en algo redundante en contextos en los que en su día fue el único agente informativo o el predominante. La crisis griega, que comenzó a finales de 2009, y los agentes implicados en su gestión son un buen ejemplo: el Gobierno y el Estado griegos tenían que interactuar «por arriba» con la Unión Europea, el Banco Central Europeo, el Fondo Monetario Internacional, las agencias de calificación, etcétera, y «por abajo» con los medios de comunicación griegos y las multitudes congregadas en la plaza Syntagma, los mercados financieros y los inversores internacionales, la opinión pública alemana, etcétera.



Está claro que el Estado-nación histórico no va a renunciar a su papel sin luchar. En muchos contextos está intentando recuperar su primacía como superagente informativo que regula la vida política de la sociedad que organiza. En algunos casos, este intento es descarado. En el Reino Unido, el Gobierno laborista introdujo la primera ley de documento de identidad en noviembre de 2004. Tras varias fases intermedias, el 21 de enero de 2011, la *Identity Cards Act* fue derogada y sustituida por la *Identity Documents Act 2010*. El plan fallido de introducir un carné de identidad obligatorio en el Reino Unido debe leerse desde una perspectiva moderna y westfaliana. En muchos casos es una «resistencia histórica» sigilosa, como cuando una sociedad de la información, que se caracteriza por el papel esencial que desempeñan los bienes intelectuales e intangibles (economía del conocimiento), los servicios de información intensiva (servicios para empresas y propiedades, finanzas y seguros) y los sectores públicos (sobre todo educación, administración pública y atención sanitaria) es gestionada en gran medida por el Estado, que mantiene su papel de agente informativo principal ya no solo legalmente, sobre la base de su poder sobre la legislación y su implantación, sino también económicamente, sobre la base de su poder sobre la mayoría de los empleos basados en la información. La presencia invasora del llamado «capitalismo de Estado», con sus empresas de propiedad estatal en todo el mundo, desde Brasil a Francia, o China, es un síntoma evidente de anacronismo hiperhistórico.

Formas similares de resistencia solo parecen capaces de retrasar el inevitable ascenso de los SMA políticos. Por desgracia, esto puede acarrear grandes riesgos, no solo en el ámbito local, sino sobre todo global. Recordemos que las dos guerras mundiales pueden considerarse el fin del sistema westfaliano. Paradójicamente, mientras la humanidad se adentra en la era hiperhistórica, el mundo presencia el ascenso de China, un Estado soberano fundamentalmente «histórico», y el declive de Estados Unidos, un Estado soberano que, más que ninguna otra superpotencia, ya mostró en el pasado su vocación hiperhistórica y multiagente en su organización federal. Podríamos estar pasando de un consenso de Washington a un consenso de Pekín, descrito por Williamson como un capitalismo autoritario de Estado dirigido por las exportaciones con un incremento de las reformas, la innovación





y la experimentación. Todo esto es peligroso, porque el historicismo anacrónico de las políticas chinas junto al crecimiento del hiperhistoricismo en la humanidad nos abocan a una confrontación. Puede que no llegue a conflicto, pero la hiperhistoria ya está aquí y, aunque todo apunta a que el Estado chino resurgirá de la confrontación profundamente transformado, solo cabe esperar que la inevitable fricción sea lo más indolora y pacífica posible. Las crisis económicas y sociales que atraviesan en la actualidad las sociedades de la información más avanzadas pueden ser, de hecho, el doloroso, aunque pacífico, precio a pagar para adaptarnos a un futuro orden posconsenso de Washington.

La conclusión anterior es válida para los Estados históricos en general: en el futuro veremos adquirir cada vez más protagonismo a los SMA políticos, mientras que los Estados dejarán poco a poco de resistirse a los cambios hiperhistóricos y evolucionarán ellos mismos hacia SMA. Buenos ejemplos de ello son la cesión de competencias o la creciente tendencia a convertir los bancos centrales, como el Banco de Inglaterra o el Banco Central Europeo, en organizaciones públicas independientes.

Ha llegado el momento de analizar más a fondo la naturaleza de los SMA políticos y algunas de las cuestiones que ya están planteando su aparición.

LOS SMA POLÍTICOS

El SMA político es un sistema constituido por otros sistemas⁴ que, como agente único, es:

- a) Teleológico: el SMA tiene un objetivo, que persigue a través de sus acciones.
- b) Interactivo: el SMA y su entorno pueden interactuar de forma recíproca.
- c) Autónomo: el SMA puede cambiar sus configuraciones sin dar una respuesta directa a la interacción, mediante transiciones internas para cambiar sus estados. Esto dota al SMA de cierto grado de complejidad e independencia respecto a su entorno.
- d) Adaptable: las interacciones del SMA pueden alterar las reglas por las que el SMA cambia sus estados. La adaptabilidad asegura que el SMA aprende su propio modo de funcionamiento de una manera que depende esencialmente de su experiencia.

El SMA político se convierte en inteligente (en el sentido de que aprende) cuando implanta las funciones a-d con eficiencia y eficacia, minimizando recursos, desperdicios y errores, y a la vez maximizando los resultados de sus acciones. La emergencia de SMA inteligentes y políticos plantea muchas cuestiones transcendentales, cinco de las cuales merece la pena analizar aquí, aunque sea por encima: identidad y cohesión, consentimiento, espacio social frente a espacio político, legitimidad y transparencia (el SMA transparente).

Identidad y cohesión

A lo largo de la modernidad, el Estado ha abordado el problema de establecer y mantener su propia identidad trabajando sobre la ecuación Estado = Nación, a menudo a través del medio legal de la ciudadanía y la narrativa retórica del espacio (la madre patria) y el tiempo (narrativa



en el sentido de tradiciones, celebraciones recurrentes de acontecimientos pasados que han levantado la nación, etcétera). Consideremos, por ejemplo, la introducción del servicio militar obligatorio durante la Revolución francesa, su creciente popularidad en la historia moderna, y pensemos a continuación en el número, cada vez menor, de Estados soberanos en los que sigue siendo obligatorio hoy. El servicio militar obligatorio transformó el derecho a hacer la guerra, de un problema eminentemente económico —por ejemplo, los banqueros florentinos financiaron a la Corona inglesa durante la guerra de los Cien Años (1337-1453)— pasó a ser un problema también legal: el derecho del Estado a enviar a sus ciudadanos a morir en su nombre, convirtiendo así la vida humana en el penúltimo valor disponible para el último sacrificio en aras del patriotismo. «Por el Rey y la Patria» es un signo de anacronismo moderno al que siguen cayendo en la tentación de recurrir, en momentos de crisis, los Estados soberanos para avivar el nacionalismo acerca de enclaves geográficos insignificantes, a menudo un islote que no merece ningún sacrificio humano, como las Malvinas o las islas Senkaku o Diaoyu.

La ecuación entre Estado, nación, ciudadanía y tierra/historia tuvo la ventaja extra de proporcionar una respuesta a un segundo problema, el de la cohesión, ya que no solo responde a la pregunta de quién o qué es el Estado, sino también a la de quién o qué pertenece al Estado y por tanto está sometido a sus normas, políticas y acciones. Los nuevos SMA políticos no pueden confiar en la misma solución. De hecho, se enfrentan a otro problema, el de hacer frente al desacoplamiento de su identidad política y su cohesión. La identidad política de un SMA puede ser muy fuerte y, sin embargo, no guardar ninguna relación con su cohesión intermitente y algo imprecisa, como es el caso del movimiento Tea Party en Estados Unidos. La identidad y la cohesión de un SMA político pueden ser sin duda débiles, como en el movimiento internacional Occupy. O se puede advertir una fuerte cohesión sin una clara identidad política, como en el caso de la multitud de tuiteros y su papel durante la Primavera Árabe. La identidad y la cohesión de un SMA político se establecen y mantienen compartiendo información. La Tierra es virtualizada en la región de la infoesfera en la que opera el SMA. Así la Memoria (registros recuperables) y la Coherencia (actualizaciones fiables) del flujo de información permiten a un SMA político reivindicar cierta identidad y cierta cohesión, y por tanto ofrecer un sentido de pertenencia. Pero sobre todo es el hecho de que las fronteras entre *online* y *offline* se estén difuminando, la aparición de la experiencia *onlife* y que como

«La innovación tecnológica implica invención, aceptación, rechazo a los cambios, conflicto entre lo viejo y lo nuevo, movimientos de riqueza y poder, de modificación del trabajo, nueva cultura, nueva conciencia, nueva sociedad.»

DOMENICO DE MASI (1938)

Sociólogo italiano del trabajo, autor de
La fantasia e la concretezza (2003)

27 de noviembre de 2011. Dos activistas
cairotes siguen los mensajes de Twitter
la víspera de las primeras elecciones
legislativas en Egipto tras la caída del
dictador Hosni Mubarak



WHS

PROGRESSIVE
PREMIUM
SPORTING GOODS
EXCLUSIVELY.

WHS



WEB-CONNECTED WEAR SYSTEM



consecuencia la infoesfera virtual pueda afectar políticamente al espacio físico lo que refuerza el sentido del SMA político como agente real. Si Anonymous tuviera solo una existencia virtual, su identidad y su cohesión serían mucho menos fuertes. Los hechos proporcionan un equivalente vital al flujo de información virtual para garantizar la cohesión. Una ontología de las interacciones sustituye a una ontología de las entidades, o, mediante un juego de palabras, las *-ings* o sufijo *-ando* (como en *interact-uando*, *proces-ando*, *interconect-ando*, *hac-iendo*, *si-endo*, etcétera) sustituyen a las cosas (*things*).

Consentimiento

Una consecuencia importante de la desintegración de la ecuación «SMA político = Estado-nación = Ciudadanía = Tierra = Historia» y el desacoplamiento de la identidad y la cohesión en un SMA político es que el viejo problema teórico de cómo consentir que nos gobierne una autoridad política se ve desde una nueva perspectiva. En el marco histórico de la teoría del contrato social, la supuesta actitud por defecto es la de una dejación legal: existe algún tipo de consentimiento original (a concretar) a priori presuntamente concedido (atendiendo a una serie de motivos) por un individuo al Estado político para ser gobernado por este último y sus leyes. El problema es entender cómo se da este consentimiento y qué sucede cuando un agente, sobre todo un ciudadano, decide no aceptarlo (se sitúa fuera de la ley). En el marco hiperhistórico, la actitud por defecto esperada es optar por la integración social, que se ejerce siempre que un agente se somete al SMA político de modo condicional y para un fin concreto. Simplificando mucho, estamos pasando de formar parte del consenso político a participar en él, y esta participación tiene una naturaleza cada vez más «justo a tiempo», «bajo demanda», «orientada a objetivos» y en absoluto permanente, no a largo plazo ni estable. Si hacer política se parece cada vez más a hacer negocios es porque, en ambos casos, el interlocutor, el ciudadano-consumidor necesita ser convencido cada vez. La actitud por defecto no es de pertenencia leal, y tiene que ser construida y renovada por igual para productos políticos y comerciales. Generar consentimiento alrededor de asuntos políticos concretos se convierte en un proceso de recaptación continua. No es una cuestión de medir la atención a la política —la queja generalizada de que las «nuevas generaciones» son incapaces de concentrar su atención en los problemas políticos carece de fundamento, ya que, después de todo, son las generaciones que se han atiborrado de televisión—, sino de suscitar interés una y otra vez sin caer en la inflación semántica (una crisis más, una emergencia más, una revolución más, etcétera) ni la fatiga política (¿cuántas veces hay que intervenir urgentemente?). El problema es, por tanto, entender qué puede motivar repetidamente o incluso forzar a los agentes (una vez más, no solo seres humanos individuales, sino todo tipo de agentes) a dar su consentimiento y comprometerse, y lo que sucede cuando los agentes, no comprometidos por defecto (nótese que no uso «desvinculados», ya que esto implicaría un estado previo de vinculación), prefieran quedarse



al margen de las actividades del SMA político, ocupando una esfera social de «nonimato» (ausencia de «anominato») civil pero apolítico. No entender la transformación previa de la autoexclusión histórica hasta la integración hiperhistórica significa que tampoco es probable que se entienda la aparente incoherencia entre el desencanto individual con los políticos y la popularidad de los movimientos globales, las movilizaciones internacionales, el activismo, el voluntariado y otras fuerzas sociales con enormes implicaciones políticas. No es la política en sí misma la que está moribunda, sino la política histórica, que se basa en partidos, clases, funciones sociales fijas y el Estado-nación, que buscó la legitimación política solo en una ocasión y la fue consumiendo hasta que fue derogada. El sutil desplazamiento continuo hacia el llamado centro político por parte de los partidos en las democracias liberales de todo el mundo, así como las estrategias «Get out the vote» (GOTV es el acrónimo en inglés de esta estrategia que hace referencia a la movilización de votantes propios y a asegurarse de que acuden a votar) son pruebas de que el compromiso tiene que renovarse y ampliarse de manera constante para ganar unas elecciones. Ser militante de un partido (y también de un sindicato) es una situación moderna que probablemente se hará cada vez menos común.

Espacio social frente a espacio político

Entender la anterior inversión de actitudes por defecto significa que nos enfrentamos a otro problema. De nuevo simplificando mucho, en la prehistoria los espacios social y político se solapaban porque en una sociedad sin Estado no existe una diferencia real entre relaciones sociales y políticas, de ahí las interacciones. En la historia, el Estado intenta mantener esa extensión compartida ocupando políticamente, como un SMA informativo, todo el espacio social, estableciendo por tanto la primacía de lo político sobre lo social. Esta tendencia, si no se controla o se compensa, puede dar lugar a totalitarismos (por ejemplo, la Italia de Mussolini), o al menos a democracias deterioradas (por ejemplo, la Italia de Berlusconi). Ya hemos visto antes que dicha extensión compartida y su control pueden basarse en estrategias normativas o económicas, mediante el ejercicio del poder, la fuerza y la imposición de normas. En la hiperhistoria, el espacio social es el espacio original por defecto desde el que los agentes pueden moverse hacia (dar su consentimiento a) una unión con el espacio político. No es accidental que conceptos como sociedad civil (en el sentido poshegeliano de sociedad no política), esfera pública (también en un sentido no habermasiano) y comunidad adquieran cada vez más importancia en la medida en que nos vamos acercando al contexto hiperhistórico. El problema es entender ese espacio social en el que se supone que interactúan agentes de distintos tipos y que provoca la aparición de SMA políticos.

Cada agente, como ya he explicado, tiene cierto grado de libertad. No me refiero a libertad, autonomía o autodeterminación, sino más bien, en un sentido mecánico, más humilde, a determinadas capacidades o habilidades apoyadas con los recursos apropiados, para participar en acciones concretas con fines concretos. Por usar un ejemplo elemental, una máquina de café solo tiene un cierto grado de libertad: puede hacer café siempre que se le suministren los ingredientes correctos y la energía necesaria. La suma de los grados de libertad de un agente es su «agencia». Cuando el agente está solo, hay agencia, pero no espacio social, y mucho menos político. Imaginemos a Robinson Crusoe en su «isla de la Desesperación». Sin embargo, en cuanto haya otro agente (Viernes, en la «isla de la Desesperación») o un grupo de agentes (los nativos caníbales, los naufragos españoles,



los amotinados ingleses), la agencia adquiere el valor de interacción entre múltiples agentes (es decir, social): las prácticas y después las normas para coordinar y limitar los grados de libertad de los agentes se vuelven algo esencial, en principio para el bienestar de los agentes que constituyen el SMA y luego para la buena marcha del propio SMA.

Observemos la deriva en el nivel de análisis: una vez que surge el espacio social, empezamos a considerar el grupo como grupo —una familia, una comunidad o una sociedad— y las acciones de los agentes individuales que lo componen se convierten en elementos que nos llevan a los grados de libertad recién establecidos en el SMA, o la agencia. El sencillo ejemplo utilizado antes puede servir también aquí. Consideremos ahora una máquina de café y un temporizador. Por separado son dos agentes con su propia agencia, pero si se sincronizan correctamente y se coordinan en un SMA, el agente emisor tiene la nueva agencia de hacer café a una hora determinada. Ahora es un SMA con una capacidad más compleja y que puede funcionar bien o no.

Un espacio social es, por tanto, la totalidad de los grados de libertad de los agentes que se quieren tener en cuenta. En la historia, esta consideración —que es en realidad otro nivel de análisis— quedó determinada, en gran medida, física y geográficamente en términos de presencia en un territorio, y en consecuencia también por diferentes formas de vecindad. En el ejemplo anterior, todos los agentes que interactúan con Robinson Crusoe son tomados en consideración debido a la naturaleza de sus relaciones (son más o menos interactivos dependiendo de su grado de libertad) con la propia «isla de la Desesperación». Ya hemos visto que las TIC han cambiado todo esto. En la hiperhistoria, dónde trazar la línea que incluya, o bien excluya, a los agentes cuyos grados de libertad constituyan el espacio social es cada vez más una cuestión de elección al menos implícita, cuando no claramente explícita. En consecuencia, el fenómeno de la moralidad distribuida, que engloba también el de la responsabilidad distribuida, es cada vez más común. En cualquier caso, en la historia o la hiperhistoria, lo que cuenta como espacio social puede ser un movimiento político. La globalización es una desterritorialización en este sentido político.

Si ahora pasamos al espacio político en el que operan las nuevas SMA, sería un error considerarlo un espacio aparte, independiente del espacio social: ambos están determinados por la misma totalidad de agentes con sus grados de libertad. El espacio político emerge cuando la complejidad del espacio social —entendido en términos de número y tipos de interacciones y de agentes implicados, y del grado de reconfiguración dinámica de agentes e interacciones— requiere la prevención o resolución de potenciales divergencias y la coordinación o colaboración acerca de potenciales convergencias. Ambas son cruciales. Y en cada caso se necesita más información en cuanto a representación y deliberación sobre una compleja multitud de grados de libertad. El resultado es que el espacio social se politiza a través de su informatización.

Legitimidad

Cuanto los agentes del espacio social llegan a un acuerdo sobre cómo gestionar las divergencias (conflictos) y convergencias, el espacio social adquiere la dimensión política a la que estamos tan acostumbrados. Aunque aquí acechan dos errores potenciales.

El primero, llamémoslo hobbesiano, es considerar la política solo como la prevención de la guerra por otros medios, para invertir la famosa frase de Carl von Clausewitz según la cual



«la guerra es la continuación de la política por otros medios». No es este el caso, ya que incluso una compleja sociedad de ángeles (el hombre es un lobo para el hombre) también necesitaría normas para perfeccionar esa armonía. Las convergencias también exigen política. Metáforas aparte, la función de la política es solo gestionar los conflictos ocasionados por el ejercicio del grado de libertad de cada uno de los agentes en la consecución de sus objetivos. Por encima de todo es, o al menos debería ser, avanzar en la coordinación y la colaboración entre los distintos grados de libertad sin recurrir a la coacción ni a la violencia.

El segundo error potencial, al que podríamos llamar rousseauniano, es que puede parecer que el espacio político no es más que el espacio social organizado por la ley. En este caso, el error es más sutil. Por lo común, asociamos el espacio político a las normas o leyes que lo regulan aunque estas últimas no constituyan, en sí mismas, espacio político. Comparemos dos casos en los que las normas determinan un juego. En el ajedrez, las normas no solo limitan el juego, son el juego en sí porque no resultan una actividad previa, sino que son las condiciones necesarias y suficientes que determinan los únicos movimientos que se pueden hacer legalmente. En fútbol, sin embargo, las normas sí proceden de limitaciones anteriores, ya que los agentes gozan de un grado de libertad básico y previo, que consiste en su capacidad de golpear un balón con el pie con el fin de marcar un gol, lo que se supone que está regulado en las normas. Mientras que en el ajedrez, aunque es físicamente posible, no tiene mucho sentido colocar dos peones en un mismo cuadro del tablero de ajedrez, nada impidió a Maradona marcar un gol infame usando la mano en el partido entre Argentina e Inglaterra (Copa del Mundo FIFA 1986) y que un árbitro pasara por alto la infracción.

Una vez evitados los dos errores anteriores, es más fácil ver que el espacio político es ese área del espacio social limitado por los convenios alcanzados para resolver divergencias y coordinar convergencias. Esto nos lleva a considerar más a fondo la transparencia de los SMA, sobre todo cuando, como pasa en esta época de transición, el SMA en cuestión sigue siendo el Estado.

El SMA transparente

Hay dos sentidos en los que el SMA puede ser transparente. No es nada extraño que ambos procedan de las TIC y la ciencia informática (Turilli y Floridi 2009), un ejemplo más de cómo la revolución de la información está cambiando nuestros esquemas mentales.

Por un lado, el SMA (pensemos en un Estado-nación, y también en agentes corporativos, multinacionales o instituciones supranacionales, etcétera) puede ser transparente en el sentido de que pasa de ser una caja negra a una caja blanca. Otros agentes (los ciudadanos cuando el SMA es el Estado) no solo pueden ver datos de entrada y datos de salida; por ejemplo, niveles de ingresos fiscales y gasto público también pueden vigilar cómo el SMA (en nuestro ejemplo, el Estado) funciona internamente. Esto no es ninguna novedad. Fue un principio que ya se popularizó en el siglo XIX. Sin embargo, se ha convertido en un aspecto renovado de la política contemporánea debido a las posibilidades que abren las TIC. Este tipo de transparencia también se conoce como Gobierno Abierto.

Por otro lado, y este es el sentido más innovador que quisiera recalcar aquí, el SMA puede ser transparente en el mismo sentido en que lo es una tecnología (por ejemplo, una interfaz): invisible, no porque no esté ahí, sino porque proporciona sus servicios con tanta eficiencia, eficacia y fiabilidad que su presencia es imperceptible. Cuando algo funciona a la perfección,





12 de noviembre de 1989.
Alemanes de la RFA
celebran la caída del Muro
de Berlín. En los 28 años
que estuvo en pie, murieron
138 personas al intentar
franquearlo. Las dos últimas,
el 5 de febrero de 1989

entre bastidores podría decirse, para asegurarse de que podemos operar todo lo eficiente y coherentemente que sea posible, que entonces tenemos un sistema transparente. Cuando el SMA en cuestión es el Estado, este segundo sentido de transparencia no debería verse como un modo de introducir subrepticamente, con terminología diferente, el concepto de «Pequeño Estado» o «Pequeña Gobernanza». Por el contrario, en este segundo sentido, el SMA (el Estado) es tan transparente y tan vital como el oxígeno que respiramos. Se esfuerza por ser el mayordomo ideal.⁵ No hay una terminología estándar para este tipo de SMA transparente que se vuelve perceptible solo por su ausencia. Quizá se pueda hablar de «Gobierno Amable». Esos SMA apoyarán mejor el tipo correcto de infraestructura ética (más adelante hablaré de esto) cuanto más transparentemente, es decir, de un modo abierto y amable, desarrollen el juego negociador a través del cual se hacen cargo de la cosa pública. Cuando este juego negociador falla, el resultado posible es un conflicto cada vez más violento entre las partes implicadas. Es una posibilidad trágica que las TIC han reconfigurado seriamente.

Con esto no queremos decir que la opacidad no tenga sus virtudes. Hay que ser prudentes para que el discurso sociopolítico no se vea reducido a diferencias de cantidad, calidad, inteligibilidad y utilidad de la información y las TIC. «Cuanto más, mejor» no es la única ni siempre la mejor regla empírica, dado que la retirada de información puede suponer a menudo una importante diferencia positiva. Ya encontrábamos la división de poderes del Estado en Montesquieu. Cada uno de ellos puede ser cuidadosamente opaco en el sentido correcto respecto a los otros dos. Porque puede ser necesario carecer de determinada información (o decidir voluntariamente no acceder a ella) para conseguir los objetivos deseados, como proteger el anonimato, garantizar un trato justo o implantar modelos de evaluación desprejuiciados. El famoso método de Rawls (1999), el «velo de la ignorancia», explota precisamente este aspecto de la información para desarrollar un enfoque imparcial de la justicia. Estar informado no es siempre una bendición, y podría incluso ser peligroso o erróneo, un elemento de distracción o perjudicial. La idea es que la opacidad no puede tomarse como una buena práctica en un sistema político, a menos que se adopte de manera explícita y consciente, demostrando que no es una simple traba.

INFRAÉTICA

Parte de los esfuerzos éticos engendrados por nuestra condición hiperhistórica tiene que ver con el diseño de entornos que puedan facilitar las opciones, acciones o procesos éticos de los SMA. No se trata de ética de diseño. Es más bien un diseño proético, concepto que espero poder aclarar en las páginas que siguen. Ambos son liberales, aunque el primero puede ser un tanto paternalista en el sentido de que privilegia la facilitación del tipo correcto de opciones, acciones, procesos o interacciones en representación de los agentes implicados, mientras que el último no tiene por qué serlo, dado que privilegia la facilitación de la reflexión por parte de los agentes implicados en sus opciones, acciones o procesos.⁶ Por ejemplo, el primero puede permitir a los individuos decidir no atenerse a la preferencia por defecto según la cual quien se saca el permiso de conducir también está dispuesto a ser donante de órganos. El último puede no autorizar a un individuo a sacarse el permiso de conducir si no decide antes si quiere o no donar sus órganos. En esta sección llamaré infraestructura ética o infraética





a los entornos que pueden facilitar las opciones, acciones o procesos éticos. Llamaré la atención del lector hacia el problema de cómo diseñar el tipo correcto de infraética para los SMA emergentes. En contextos o casos distintos, el diseño de una infraética liberal puede ser más o menos paternalista. Mi argumento es que debe ser lo menos paternalista que las circunstancias permitan, aunque nunca menos.

Es un signo de los tiempos que los políticos hablen de infraestructuras hoy en día y a menudo tengan en mente las TIC. No están equivocados. Desde las fortunas empresariales hasta los conflictos, lo que hace funcionar las sociedades contemporáneas depende cada vez más de los bits y no de los átomos. Ya hemos visto todo esto. Lo que resulta menos obvio, aunque filosóficamente más interesante, es que las TIC parecen haber revelado un nuevo tipo de ecuación.

Consideremos el énfasis sin precedentes que las TIC han dado a fenómenos cruciales como la confianza, la privacidad, la transparencia, la libertad de expresión, la apertura, los derechos de propiedad intelectual, la lealtad, el respeto, la fiabilidad, la reputación, el imperio de la ley, etcétera. Estos conceptos probablemente se entienden mejor en términos de una infraestructura que está ahí para facilitar o impedir (reflexionar sobre ello) la conducta moral o inmoral de los agentes implicados. Así pues, al situar nuestras interacciones informativas en el centro de nuestras vidas, las TIC parecen haber desvelado algo que, por supuesto, siempre ha estado ahí, pero de manera menos visible: el hecho de que la conducta moral de una sociedad de agentes es también una cuestión de «infraestructura ética» o simplemente infraética. Hemos pasado por alto un aspecto importante de nuestras vidas morales y, de hecho, muchos conceptos y fenómenos relacionados han sido tratados de forma equivocada como si solo fueran éticos, cuando en realidad son probablemente más infraéticos. Para usar un término de la filosofía de la tecnología, tienen una naturaleza de uso dual: pueden ser moralmente buenos, pero al mismo tiempo malos (ahora explicaré más). La nueva ecuación indica que, al igual que los sistemas corporativos y de administración en una sociedad económicamente madura requieren cada vez más infraestructuras (transportes, comunicaciones, servicios, etcétera), también las interacciones morales precisan cada vez más una infraética en una sociedad informativamente madura.

La idea de una infraética es simple, pero puede confundir. La ecuación anterior ayuda a aclararlo. Cuando un economista y un politólogo hablan de «Estado fallido», puede que se refieran al fracaso de un estado-como-una-estructura en el cumplimiento de sus funciones básicas, es decir, ejercer el control sobre sus fronteras, recaudar impuestos, hacer cumplir la ley, administrar justicia, proporcionar educación, etcétera. En otras palabras, el Estado no consigue proporcionar bienes públicos (por ejemplo, defensa y policía) ni prestaciones de calidad (por ejemplo, sanidad). O (y este «o» disyuntivo es a menudo demasiado inclusivo y ambiguo) pueden hacer referencia al colapso de un estado-como-una-infraestructura o su entorno, lo que hace posible y fomenta el tipo correcto de interacciones sociales. Esto significa que pueden referirse al colapso de un sustrato de expectativas por defecto respecto a condiciones económicas, políticas y sociales, como el estado de derecho, el respeto a los derechos civiles, un sentido de comunidad política, el diálogo civilizado entre personas de ideas diferentes, los modos de alcanzar la resolución pacífica de tensiones étnicas, religiosas o culturales, etcétera. Todas estas expectativas, actitudes, prácticas, es decir, esta «infraestructura socio-política» implícita que nosotros damos por segura, proporciona un ingrediente vital para el éxito de cualquier sociedad compleja. Desempeña un papel crucial en las interacciones humanas, comparable al que estamos acostumbrados a atribuir a las infraestructuras físicas en economía.

Por eso, la infraética no debe interpretarse en términos marxistas, como si fuera una mera actualización de la vieja idea de «base y superestructura», porque los elementos en cuestión son completamente diferentes: tratamos de acciones morales y de facilitadores aún-no-morales de dichas acciones morales. Tampoco debe interpretarse en términos de una especie de discurso normativo de segundo orden sobre ética, porque es la estructura aún-no-ética de expectativas, actitudes y prácticas implícitas lo que puede facilitar y promover decisiones y acciones morales. Al mismo tiempo, tampoco sería acertado pensar que una infraética es moralmente neutra. Al contrario, tiene una naturaleza de doble uso, como ya adelanté: puede facilitar e impedir acciones moralmente buenas y moralmente malas, y hacerlo en diferentes grados. En el mejor de los casos, es la grasa que lubrica el mecanismo moral. Es más probable que esto ocurra cuando tener una naturaleza «de doble uso» no



signifique que cada uso es igualmente probable, es decir, que la infraética en cuestión aún no sea neutra, ni meramente positiva, sino que muestre la tendencia a generar más bien que mal. Si esto es confuso, pensemos en la naturaleza de uso dual no en términos de equilibrio, como una moneda ideal que siempre ofrece caras y cruces, sino como una copresencia de dos desenlaces alternativos, uno de los cuales es más plausible que el otro, como en una moneda en la que es más probable que aparezcan caras que cruces. Cuando una infraética tiene una naturaleza «de uso dual tendencioso», es fácil confundir la ética con la infraética, dado que lo que ayuda al bien a florecer y lo que ayuda al mal a echar raíces comparten una misma naturaleza.

Cualquier sociedad compleja de éxito, sea la Ciudad de los Hombres o la Ciudad de Dios, depende de una infraética implícita. Esto es peligroso, porque la importancia creciente de la infraética puede conducir al siguiente peligro: que la legitimación del terreno ético se base en el «valor» de la infraética que se supone que lo respalda. Respaldo suele confundirse con cimientos, y puede incluso aspirar al papel de legitimador, llevándonos a lo que Lyotard criticaba como mera «performatividad» del sistema, independiente de los valores reales deseados y buscados. La infraética es la sintaxis vital de la sociedad, pero no su semántica, para usar una distinción popular en inteligencia artificial. Se trata de la forma estructural, no de los contenidos significativos.

Ya vimos que incluso en sociedades habitadas solo por ángeles, es decir, por agentes morales perfectos, seguirían siendo necesarias normas para la colaboración. En teoría, a saber, cuando uno asume que los valores moralmente buenos y la infraética que los promueve pueden estar separados (una abstracción que nunca se produce en la realidad pero que facilita nuestro análisis), puede existir una sociedad cuyos habitantes fueran todos nazis fanáticos que disfrutaran de altos niveles de confianza, respecto, fiabilidad, lealtad, privacidad, transparencia e incluso libertad de expresión, apertura y libre competencia. Claramente, lo que queremos no es solo el mecanismo de éxito que proporciona una correcta infraética, también la combinación coherente entre esto y valores moralmente buenos, como los derechos civiles. Por eso es tan difícil conseguir un equilibrio entre seguridad y privacidad, por ejemplo, a menos que aclaremos antes si estamos resolviendo una tensión dentro de la ética (seguridad y privacidad como derechos morales), dentro de la infraética (ambos se consideran facilitadores aún-no-éticos), o entre infraética (seguridad) y ética (privacidad), como yo sospecho. Por usar otra analogía: las mejores tuberías (infraética) pueden mejorar el caudal pero no la calidad del agua (ética), y un agua de la máxima calidad se desperdicia si las tuberías están oxidadas o picadas. De modo que crear el tipo correcto de infraética y mantenerlo es uno de los retos cruciales de nuestro tiempo, porque una infraética no es moralmente buena en sí misma, sino la vía más probable de proporcionar bien moral si se diseña y se combina con los valores morales correctos. El tipo correcto de infraética debe estar ahí para respaldar el tipo correcto de axiología (teoría del valor). Sin duda parte constituyente del problema relativo al diseño de los SMA apropiados.

Cuanto más compleja se vuelve una sociedad, más importante y, por ende, más relevante es el papel de una infraética bien diseñada, y no obstante parece que es ahí donde estamos fallando. Consideremos el reciente Acuerdo Comercial Antifalsificación (ACTA, por sus siglas en inglés), un tratado multinacional relativo a las normas internacionales que protegen los derechos de propiedad intelectual. Al centrarse en hacer respetar los derechos de propiedad



Activista durante una manifestación contra el Acuerdo Comercial Antifalsificación (ACTA, por sus siglas en inglés), un tratado multinacional que protege los derechos de propiedad intelectual a costa de una mayor vigilancia en las redes

intelectual (DPI), los defensores del ACTA pasaron por alto que iban a socavar la infraética que esperaban impulsar, una que fomentara algunos de los mejores y más conseguidos aspectos de nuestra sociedad de la información. Promovería la inhibición estructural de algunas de las más importantes libertades positivas del individuo y su capacidad de participar en la sociedad de la información, desarrollando así todo su potencial como organismos de información. A falta de una palabra mejor, el ACTA promovería una forma de informismo comparable a otras formas de inhibición de la agencia social, como el clasismo, el racismo o el sexismo. A veces, una defensa del liberalismo puede ser inadvertidamente antiliberal. Si queremos hacerlo mejor, tenemos que conocer aquellos problemas que, como los DPI, forman parte de la nueva infraética para la sociedad de la información. Su protección tiene que encontrar un punto equilibrado dentro de la compleja infraestructura legal y ética que ya está aquí y evoluciona constantemente y dicho sistema tiene que ponerse al servicio de valores nobles y conductas morales. Esto exige determinar un compromiso, dentro de una infraética liberal, entre los que ven la nueva legislación (por ejemplo, el ACTA) simplemente como el acatamiento de obligaciones legales y éticas ya existentes (en este caso, de anteriores acuerdos comerciales) y los que la consideran una erosión grave de las libertades civiles éticas y legales existentes.

En las sociedades hiperhistóricas, toda regulación que afecte al modo en que los individuos tratan la información está destinada a influir en la totalidad de la infoesfera y en el hábitat *onlife*. Por tanto, hacer respetar derechos (como los DPI) acaba siendo un problema medioambiental. Esto no significa que toda legislación sea por fuerza negativa. Y nos da una lección acerca de la complejidad de las cosas: desde que derechos como los DPI forman parte de nuestra infraética y afectan a la totalidad de nuestro entorno, entendido como infoesfera, las consecuencias voluntarias e involuntarias de su aplicación son de gran amplitud, interrelacionadas y trascendentales. Estas consecuencias tienen que analizarse con atención, porque los errores generarán enormes problemas con costes astronómicos para las generaciones futuras, tanto éticos como económicos. El mejor modo de manejar «desconocidos conocidos» o consecuencias inesperadas es ser cuidadoso, permanecer alerta, vigilar la evolución de las acciones emprendidas, así como estar preparado para reconsiderar cualquier decisión o estrategia con rapidez, en cuanto empiecen a notarse efectos perjudiciales. *Festina lente* («vísteme despacio, que tengo prisa»), como nos recomienda el adagio clásico. No hay una legislación perfecta, tan solo una legislación que puede ser perfeccionada con más o menos facilidad. Unos buenos acuerdos acerca de cómo dar forma a nuestra infraética deberían incluir cláusulas que contemplen actualizaciones periódicas.

Para terminar, es un error pensar que somos como forasteros gobernando un entorno diferente del que habitamos. Documentos legales (como el ACTA) nacen del interior de la infoesfera a la que afectan. Estamos construyendo, restaurando y renovando la casa desde dentro, o podría decirse que estamos reparando la canoa mientras navegamos en ella, por usar la metáfora que introduce al principio. Precisamente porque la totalidad del problema de respetar, infringir y hacer respetar derechos (como los DPI) es una cuestión infraética y medioambiental para sociedades de la información avanzadas, lo mejor que podríamos hacer para dar con la solución correcta sería aplicar al propio proceso el verdadero esquema infraético y los valores éticos que quisiéramos que promoviera. Esto significa que la infoesfera debe autorregularse desde dentro, no desde un exterior imposible.







CONCLUSIÓN: ¿LA ÚLTIMA DE LAS GENERACIONES HISTÓRICAS?

Hace seis mil años, una generación de humanos fue testigo de la invención de la escritura y el desarrollo de las condiciones que hicieron posibles las ciudades, los reinos, los imperios y los Estados-nación. Esto no es accidental. Las sociedades prehistóricas carecían de TIC y de Estado. El Estado es un fenómeno típicamente histórico. Surge cuando los grupos humanos dejan de vivir una existencia precaria en pequeñas comunidades y empiezan a vivir en la abundancia, en grandes comunidades que se convierten en sociedades políticas, con división del trabajo y con funciones especializadas, organizadas bajo alguna forma de gobierno, que usa la TIC para controlar los recursos, incluida esa clase tan especial de información llamada «dinero». Desde los impuestos a la legislación, desde la administración de justicia a la fuerza militar, desde el censo a las infraestructuras sociales, el Estado ha sido durante mucho tiempo el agente de información supremo y por eso he sugerido que la historia, y sobre todo en la modernidad, es la era del Estado.

Casi a mitad de camino entre el principio de la historia y nuestros días, Platón seguía buscando el sentido de dos cambios radicales: la codificación de los recuerdos mediante símbolos escritos y las interacciones simbióticas entre individuos y la polis o ciudad-Estado. En cincuenta años, nuestros nietos podrían considerarnos la última generación histórica organizada en Estados, de un modo no muy distinto a como consideramos nosotros a las tribus amazónicas mencionadas al principio, es decir, las últimas sociedades prehistóricas sin Estado. Puede transcurrir tiempo antes de que llegemos a entender el verdadero alcance de estas transformaciones. Y esto es un problema, porque no tenemos otros seis milenios por delante. No podemos esperar a que aparezca otro Platón dentro de unos cuantos siglos. Estamos jugando un gambito ambiental con las TIC y no nos queda mucho tiempo para ganar la partida, porque el futuro de nuestro planeta corre peligro. Tenemos que actuar ahora.



NOTAS

1. De acuerdo con los datos sobre esperanza de vida al nacer para el mundo y los grupos principales de desarrollo desde 1950 a 2050. Fuente: División de Población del Departamento de Asuntos Económicos y Sociales del Secretariado de Naciones Unidas, 2005, *Proyecciones de población mundial*, notas a la *Revisión de 2004*, Nueva York, Naciones Unidas, disponible *online*.
2. Según los datos de pobreza en el mundo, definida como el número y proporción de personas que viven con menos de 1,25 dólares al día (precios de la década de 2000), de 2005 a 2008. Fuente: Banco Mundial y *The Economist* del 29 de febrero de 2012, disponible *online*.
3. Floridi y Taddeo (de próxima publicación). Clarke y Knake 2010 abordan los problemas de la ciberguerra y la ciberseguridad desde una perspectiva política que, aunque aquí calificamos de «histórica», resulta muy útil.
4. Para un análisis más detallado, véase Floridi 2011.
5. Sobre buen gobierno y las normas del juego político global, véase Brown y Marsden 2013.
6. He tratado de desarrollar una ética de la información en Floridi (2013). Para un análisis más introductorio, véase Floridi 2010.

BIBLIOGRAFÍA

- Brown, I. y Marsden, C. T., *Regulating Code: Good Governance and Better Regulation in the Information Age*, Cambridge, Massachusetts, The MIT Press, 2013.
- Clarke, R. A. y Knake, R. K., *Cyber War: The Next Threat to National Security and What to Do About It*, Nueva York, Ecco, 2010.
- Floridi, L., *The Philosophy of Information*, Oxford, Oxford University Press, 2011.
- Floridi, L., *The Ethics of Information*, Oxford, Oxford University Press, 2013.
- Floridi, L. (ed.), *The Cambridge Handbook of Information and Computer Ethics*, Cambridge, Cambridge University Press, 2010.
- Floridi, L. y Taddeo, M. (eds.), *The Ethics of Information Warfare*, Nueva York, Springer, 2014.
- Linklater, A., *The Transformation of Political Community: Ethical Foundations of the Post-Westphalian Era*, Oxford, Polity, 1998.
- Rawls, J., *A Theory of Justice* (ed. rev.), Cambridge, Massachusetts, Belknap Press of Harvard University Press, 1999.
- Steil, B., *The Battle of Bretton Woods John Maynard Keynes, Harry Dexter White, and the Making of a New World Order*, Princeton, Nueva Jersey Princeton University Press, 2013.
- Turilli, M. y Floridi, L., «The Ethics of Information Transparency», en *Ethics and Information Technology*, vol. 11, n.º 2, 2009, pp. 105-112.



Imponderables tecnológicos: riesgo existencial y una humanidad en transformación

SEÁN Ó HÉIGEARTAIGH

Imagen de apertura:
Chris Jordan
Crushed cars #2, Tacoma (2004)
Serie «Intolerable Beauty: Portraits of
American Mass Consumption»
44 x 62 cm



Seán Ó hÉigeartaigh

Centre for the Study of Existential Risk (CSER), Cambridge, Reino Unido

Seán Ó hÉigeartaigh es director ejecutivo del Centre for the Study of Existential Risk (CSER) de Cambridge, centro de investigación de primer nivel sobre riesgos globales y tecnologías emergentes. Es codesarrollador del Centre for the Future of Intelligence, una nueva colaboración Cambridge-Oxford-Imperial-Berkeley sobre las oportunidades y retos de la inteligencia artificial. Con anterioridad dirigió programas de investigación interdisciplinares sobre tecnologías emergentes y modelos de riesgos catastróficos en el Future of Humanity Institute de Oxford. Sus áreas de investigación incluyen tecnologías emergentes, riesgos, política tecnológica, estudio del horizonte y predicción. Es doctor en genómica por el Trinity College de Dublín.

La humanidad se ha enfrentado siempre a amenazas a su supervivencia global tales como impactos de asteroides y supervolcanes. Y, sin embargo, es posible que los riesgos más graves a los que nos enfrentamos sean resultado de nuestro progreso científico y como civilización. Estamos desarrollando tecnologías de poder sin precedentes, como las armas nucleares o la ingeniería genética. También estamos erradicando especies, cambiando el clima y agotando los recursos del planeta a un ritmo insostenible a medida que crece la población mundial. No obstante, los avances del siglo que viene en ciencia y tecnología también proporcionarán soluciones a muchos de estos grandes retos.

UNA NUEVA ERA DE RIESGO

En los albores del 26 de septiembre de 1983, Stanislav Petrov estaba de servicio en un búnker secreto a las afueras de Moscú. Como teniente coronel en las fuerzas de defensa aérea soviéticas, su labor consistía en supervisar el sistema soviético de alerta temprana ante ataques nucleares. Eran tiempos de gran tensión. Ese mismo mes los reactores soviéticos habían derribado un avión de pasajeros coreano, un incidente que el presidente de Estados Unidos, Ronald Reagan, había calificado de «crimen contra la humanidad que nunca se debería olvidar». La KGB había enviado a sus operadores un mensaje táctico urgente que les urgía a prepararse para una posible guerra nuclear.

El sistema de Petrov informaba de un lanzamiento de misiles de Estados Unidos. Guardó la calma, al sospechar un error informático. El sistema informó entonces de un segundo, un tercer, un cuarto y un quinto lanzamientos. Las alarmas saltaban entre destellos de luces. Petrov tenía «una sensación extraña en el estómago»;¹ ¿por qué iba Estados Unidos a iniciar una guerra nuclear con solo cinco misiles? A falta de más información, emitió por radio el aviso de falsa alarma. Más tarde se supo que el destello de la luz del sol en las nubes en un ángulo inusual había disparado el sistema.

No había sido un incidente aislado. A lo largo de la Guerra Fría, la humanidad estuvo al borde de una guerra nuclear a gran escala en muchas ocasiones.² En algunas, los culpables eran los sistemas informáticos, y la intuición humana la que salvaba la situación. En otras ocasiones, se trataba de un error de juicio humano, pero había otras mentes más serenas que evitaban la guerra termonuclear. Otras veces bastaba una bandada de gansos para disparar el sistema. Nada menos que en 1995, el lanzamiento de un cohete meteorológico noruego provocó que se abriera el maletín nuclear delante del presidente de Rusia, Boris Yeltsin.





Si cada uno de estos acontecimientos representara el lanzamiento de una moneda, una situación en la que unas circunstancias ligeramente distintas —como un oficial distinto en un lugar distinto, con una mentalidad distinta— podían haber desencadenado una guerra nuclear, hemos estado jugándonos la vida durante los últimos setenta años o más. Y con una buena suerte pasmosa.

EL RIESGO EXISTENCIAL Y UNA HUMANIDAD EN TRANSFORMACIÓN

La humanidad ya ha cambiado mucho en el transcurso de su vida como especie. Pese a que desde el punto de vista biológico no somos diametralmente distintos a los humanos de hace 70.000 años, las capacidades que nos otorgan nuestros logros científicos, tecnológicos y socioculturales han transformado el significado de qué es ser humano. Ya sea mediante los procesos agrícolas, la invención de la máquina de vapor, las prácticas de almacenamiento y transmisión de saber e ideas y los mecanismos para un trabajo conjunto y eficaz en grandes grupos, hemos aumentado nuestras capacidades biológicas de un modo espectacular. Podemos levantar objetos más pesados de lo que permite nuestra biología, almacenamos y tenemos a nuestra disposición más información de la que pueden contener nuestros cerebros y resolvemos de un modo colectivo problemas que de manera individual nos resultarían imposibles.

La especie cambiará todavía más durante las décadas y los siglos venideros, en la medida en que desarrollemos la capacidad de modificar nuestra biología, ampliar nuestras capacidades mediante varias formas de interacción humano-máquina y ahondar en el proceso de innovación sociocultural. A largo plazo, el futuro es enormemente prometedor: el progreso continuado podría permitir a la humanidad propagarse por una galaxia que, hasta donde sabemos, parece carente de vida inteligente. Sin embargo, lo que seremos en el futuro poco se asemejará a lo que somos ahora, tanto físicamente como en cuestión de capacidades. Es posible que nuestros descendientes sean aumentados mucho más allá de lo que hoy reconocemos como humano.

Esto se refleja en la cuidadosa redacción de la definición que Nick Bostrom hace del riesgo existencial, que es la definición estándar que se emplea en esta área: un riesgo existencial es «un riesgo que amenaza con la extinción prematura de la vida inteligente de origen terrestre o con la destrucción permanente y

drástica de su potencial para un desarrollo futuro deseable».³
Los académicos de este campo se preocupan menos por la forma que pueda adoptar la humanidad en un futuro lejano y más por evitar las circunstancias que puedan arrebatar a nuestros descendientes, con independencia de la forma que adquieran, la oportunidad de prosperar.

Se podría dar el caso si un acontecimiento cataclísmico fuera a borrar a nuestra especie del mapa (y, con ello, quizá la capacidad de nuestro planeta de alojar vida inteligente en un futuro). Otra posibilidad consistiría en un cataclismo que estuviera a punto de extinguir a la humanidad pero modificara nuestras circunstancias de un modo que imposibilitara un ulterior progreso. Por ejemplo, un cambio climático desenfrenado no solo podría eliminarnos a todos, también dejar con vida a muy pocos de nosotros, dispersos por los polos y con un acceso a recursos tan limitado que haría imposible seguir progresando en el plano científico, tecnológico y cultural. En lugar de expandirnos por las estrellas, quizá nos obligaría a permanecer bloqueados en una batalla permanente por la supervivencia en un mundo mucho menos generoso.

Los riesgos que siempre hemos afrontado

Durante los dos primeros centenares de miles de años de historia humana, los riesgos que han amenazado al conjunto de nuestra especie han permanecido relativamente constantes. En Indonesia, el cráter del lago Toba es la consecuencia de una catastrófica supererupción volcánica ocurrida hace 75.000 años y que lanzó a la atmósfera una cifra estimada de 2.800 kilómetros cúbicos de materia. Mucho más tarde, la eyección de una masa de solo una centésima parte de volumen, procedente de la erupción del Tambora (la mayor de la historia reciente), bastó para generar el «año sin verano» de 1816, cuya interferencia con las cosechas causó una escasez de alimentos masiva en el hemisferio norte. Algunas líneas empíricas indican que entonces el incidente del Toba pudo haber eliminado a la gran mayoría de la población humana, aunque es un argumento controvertido. En el cráter del Chicxulub, en México, los geólogos descubrieron las marcas del meteorito que entonces, muy probablemente, eliminó al 75% de las especies de la Tierra en aquel momento, incluidos los dinosaurios, hace 66 millones de años. Este suceso podría haber desembocado, en términos de espacios de vida disponibles, en la aparición de las especies de mamíferos y, en última instancia, de la humanidad.

Si profundizamos más en la historia de la Tierra, descubrimos otros incidentes todavía más cataclísmicos para las especies precedentes. La extinción pérmica-triásica eliminó entre el 90% y el 96% de las especies del momento. Entre las posibles causas se encuentran los impactos de meteoritos, un cambio climático súbito debido, quizá, al incremento de las emisiones de metano, la actividad volcánica a gran escala o una combinación de estos factores. Si nos remontamos todavía más en la historia, las cianobacterias que introdujeron el oxígeno en nuestra atmósfera y generaron las condiciones para la vida basada en la respiración de



En el Parque Nacional de Yellowstone (Wyoming, EEUU) se encuentra uno de los puntos calientes del planeta en los que se podría producir una explosión volcánica masiva

oxígeno tuvieron su contrapartida: causaron la extinción de la práctica totalidad de la vida existente en ese momento, para la cual el oxígeno era venenoso, y desencadenaron una edad de hielo que convirtió a la Tierra en algo semejante a una «bola de nieve».

La amenaza planteada por los impactos de meteoritos o asteroides o los supervolcanes no es solo cosa del pasado. En principio, un asteroide podría impactar en la Tierra en cualquier momento y con escaso preaviso. Varios puntos calientes geológicos podrían desencadenar una erupción volcánica; entre ellos, el más famoso es el punto caliente de Yellowstone, considerado «maduro» para otra explosión volcánica masiva.

No obstante, en la escala de la historia humana, estos riesgos tienen una probabilidad muy baja de ocurrir en el siglo próximo o, de hecho, en cualquier siglo en concreto. Han pasado 660.000 siglos desde el acontecimiento que liquidó a los dinosaurios; las probabilidades de que el siguiente hecho de este tipo suceda durante nuestra vida son de uno entre un millón. En cuanto a que Yellowstone «ya está maduro», significa que los geólogos esperan que un acontecimiento como ese se produzca en algún momento de los próximos 20.000-40.000 años. Además, estas amenazas son estáticas; hay poca evidencia de que sus probabilidades, características o modos de impacto estén cambiando de manera significativa en términos de la escala temporal de la civilización humana.

Nuevos desafíos

Nuestro progreso como civilización ha ido acompañado de la aparición de nuevos desafíos. A medida que nos organizábamos en grupos más grandes y en ciudades, facilitábamos el contagio de la enfermedad entre nosotros. Durante la Edad Media, las epidemias de peste negra eliminaron entre el 30% y el 60% de la población europea. Asimismo, nuestros viajes por el planeta nos permitieron llevar con nosotros enfermedades a lugares a los que, de otro modo, jamás hubieran llegado: tras la colonización europea de las Américas, los brotes de enfermedades liquidaron al 95% de las poblaciones nativas.

Por otra parte, la Revolución Industrial permitió unos cambios enormes en nuestras capacidades como especie. Sentó las bases de un progreso veloz en el saber científico, la ingeniería y la capacidad de manufactura. Nos permitió sacar mucho partido de fuentes de energía baratas, potentes y de acceso rápido, los combustibles fósiles. Nos ayudó a sustentar una población mundial mucho más numerosa. De este modo, la población mundial creció hasta más del doble entre 1700 y 1850 y la población de Inglaterra (origen de la Revolución Industrial) se incrementó de 5 a 15 millones durante el mismo periodo, para volver a duplicarse hasta los 30 millones antes de acabar 1900.⁴ En efecto, estas nuevas capacidades tecnológicas nos permitían extraer más recursos, imponer cambios mucho mayores sobre nuestro medioambiente y sustentar a más humanos de lo que jamás había sido posible. Desde entonces no hemos cesado de acelerar en ese mismo camino, con un mayor grado de globalización, más desarrollo científico y tecnológico, una población mundial creciente y, al menos en los países desarrollados, un aumento de la calidad de vida y la huella que representa el consumo de recursos.

El 16 de julio de 1945, el día de la prueba nuclear Trinity, se alcanzó otro hito. La humanidad había desarrollado un arma que podía, de un modo plausible, cambiar el medioambiente planetario de un modo extremo, hasta el punto de amenazar la continuidad de la existencia de la especie humana.







Poder, coordinación y complejidad

Hoy la humanidad cuenta con una capacidad de dar forma a su entorno, tanto a escala local como planetaria, mucho mayor que la de cualquier especie cuya existencia conozcamos; superior incluso a la de las cianobacterias que permitieron a este planeta albergar la vida basada en la respiración de oxígeno. En todo el mundo hemos transformado amplias superficies de tierra para nuestros propósitos: en campos para producir alimentos para nosotros, en ciudades para cobijar a miles de millones de personas, en carreteras para facilitar nuestro transporte, en minas de las que obtener nuestros recursos materiales y en vertederos para albergar nuestros residuos. Hemos desarrollado estructuras y herramientas, como el aire acondicionado y la calefacción, que nos permiten poblar casi todos los hábitats de la Tierra, redes de suministro necesarias para sustentarnos en estos distintos lugares y avances científicos (como los antibióticos y las prácticas como el saneamiento y el control de plagas) para defendernos de los patógenos y las plagas de nuestro entorno. Asimismo, nos modificamos para adaptarnos mejor a nuestro entorno, por ejemplo, mediante las vacunas.

Este mayor poder sobre nosotros y nuestro entorno, combinado con los métodos para poner en red y coordinar nuestras actividades sobre un gran número y extensión de zonas, nos ha otorgado una gran resistencia contra muchas de las amenazas que afrontamos. En la mayor parte del mundo desarrollado podemos garantizar un acceso adecuado a alimentos y agua a la gran mayoría de la población, dadas unas condiciones de fluctuación normal de las cosechas; nuestras fuentes de alimentos son variadas en tipo y en origen geográfico y muchos países almacenan una reserva alimentaria. De modo similar, las redes eléctricas proporcionan una fuente estable de energía a las poblaciones del mundo desarrollado, con unas condiciones normales de fluctuación de la producción. Contamos con unos sistemas adecuados de higiene y de acceso a servicios médicos, dadas unas fluctuaciones normales en la carga de enfermedades; y así sucesivamente. Por añadidura, tenemos los recursos y la estabilidad social suficientes como para financiar a muchas personas brillantes para que trabajen en soluciones de nuevos problemas o en el progreso de nuestras ciencias y tecnologías, a fin de que nos proporcionen herramientas cada vez mejores para modificar nuestro medio, incrementar nuestra calidad de vida y resolver nuestros problemas futuros.

Huelga decir que estos privilegios, que existen en un grado mucho menor en los países en vías de desarrollo, en muchos casos se derivan de relaciones de explotación con dichos países, pero esta es una cuestión que va más allá del alcance de este capítulo. Este se centra en la resistencia o la vulnerabilidad del ser humano como especie, que está más relacionada con la resistencia del más favorecido que con la vulnerabilidad del más desfavorecido, excepto en la medida en que las catástrofes que afectaran a las poblaciones más vulnerables del mundo influirían, sin duda alguna, en la resistencia de las poblaciones menos vulnerables.

Sin embargo, muchas de las herramientas, redes y procesos que nos hacen más resistentes y eficientes en circunstancias «normales» nos hacen más vulnerables en condiciones extremas. Pese a que una alteración moderada (por ejemplo, una cosecha local de bajo rendimiento) puede ser absorbida por una red y compensada, una alteración catastrófica puede sobrepasar el sistema entero e influir de un modo impredecible en los sistemas conectados con este. Los sistemas cruciales para que prospere el ser humano, como los alimentos, la energía y el agua, están interrelacionados de un modo inextricable (el denominado «nexo alimentos-energía-agua»), y una alteración sobre uno tendría, casi con total seguridad, un impacto en la



estabilidad de los demás. Asimismo, afectan a otros procesos humanos o sujetos a influencia humana y, a su vez, reciben la influencia de estos: nuestra infraestructura física, electrónica y de comunicaciones, nuestra estabilidad política (las guerras tienden a preceder y suceder a las hambrunas), nuestros sistemas financieros y la meteorología extrema (un fenómeno cada vez más sujeto a la influencia humana). Estas interacciones son muy dinámicas y difíciles de predecir. No tenemos demasiada idea sobre cuál sería todo el impacto regional y mundial de un eventual agotamiento del suministro de agua del Himalaya, aunque sería razonable aventurar que habría, entre otras cosas, sequías, grandes problemas en las cosechas y hambrunas masivas, crisis financieras, una crisis migratoria a gran escala y enfrentamientos bélicos regionales que podrían alcanzar una dimensión nuclear y una escalada internacional. Aunque sea poco probable, no resulta inimaginable que, a través de una serie de desgraciados acontecimientos, una catástrofe avanzara hasta amenazar con el desmoronamiento de la civilización mundial.

En este sentido, hay dos factores que destacan. En primer lugar, los procesos que sustentan la salud de nuestro planeta están interrelacionados a través de todo tipo de vías complejas, y nuestras actividades sirven para incrementar el grado de complejidad, interrelación e impredecibilidad, especialmente en el caso de los acontecimientos extremos. El segundo factor radica en que, a pesar de nuestros diversos procesos coordinados, como especie tenemos una capacidad muy limitada para actuar como una entidad coordinada a escala planetaria, capaz de tomar las medidas más racionales en interés del conjunto de la humanidad o en el mejor interés de nuestra supervivencia y prosperidad continuadas.

Este segundo factor se manifiesta en la desigualdad mundial, que en ciertos aspectos beneficia a los países desarrollados, pero que al tiempo genera grandes vulnerabilidades en el planeta: las sequías, las hambrunas, las inundaciones y los desplazamientos masivos de población que probablemente causaría el cambio climático en el mundo en vías de desarrollo tendrían, sin duda alguna, un efecto negativo incluso sobre los países más ricos. Se manifiesta también en la incapacidad para actuar de un modo óptimo ante muchos de nuestros mayores retos. Una comunicación más eficaz en la acción y la distribución de recursos nos otorgaría más resistencia ante los estallidos de pandemias, como tan bien evidenció el brote de ébola de 2014: un brote relativamente leve de lo que debería de ser una enfermedad fácil de controlar puso de relieve lo inadecuado de la preparación y la respuesta ante pandemias.^{5,6} Tuvimos suerte de que no se tratara de una enfermedad de mayor potencial pandémico, como una capaz de transmitirse por el aire y caracterizada por periodos de incubación largos.

Nuestra capacidad limitada para coordinar nuestros intereses a largo plazo se manifiesta también en la dificultad para reducir nuestro uso global de recursos, limitar el impacto de nuestras actividades colectivas en nuestro hábitat planetario e invertir nuestros recursos de un modo óptimo para nuestra supervivencia y nuestro bienestar a largo plazo. Este problema limita a su vez

nuestra capacidad para garantizar que los avances en la ciencia y la tecnología se apliquen al progreso de nuestro bienestar y nuestra resistencia, en lugar de resultar desestabilizadores o, incluso, ser empleados con propósitos de hostilidad catastrófica, como en el caso de las armas nucleares.

Los problemas de acción colectiva son tan antiguos como la humanidad⁷ y hemos avanzado mucho en el diseño de instituciones eficaces, en especial tras la Primera y la Segunda Guerras Mundiales. Sin embargo, los riesgos que entrañan estos problemas crecen enormemente a medida que crece nuestro poder de influencia en nuestro entorno, ya sea mediante la cruda realidad de los números y la distribución en el planeta o a través de herramientas científicas y tecnológicas más potentes por medio de las cuales conseguir nuestro sinfín de objetivos o frustrar los de nuestros iguales. En la era en la que estamos entrando, los mayores riesgos que se nos presentan tienen una probabilidad abrumadoramente alta de ser el producto de nuestras propias actividades y de nuestra falta de capacidad para domeñar y limitar nuestro poder de forma colectiva.

NUESTRA HUELLA EN LA TIERRA

Población y uso de los recursos

Las Naciones Unidas estimaron que, a fecha de marzo de 2016, la población de la Tierra era de 7.400 millones de personas, por encima de los 6.100 millones de 2000, los 2.500 millones de 1950 y los 1.600 millones de 1900. El crecimiento a largo plazo es difícil de predecir (está sujeto al efecto de muchas variables inciertas, como las normas sociales, las enfermedades y las catástrofes) y, por consiguiente, varía mucho entre estudios. No obstante, las proyecciones de las Naciones Unidas apuntan, en estos momentos, a un crecimiento constante a lo largo del siglo XXI, aunque con una tasa de crecimiento más lenta, hasta alcanzar casi los 11.000 millones en 2100.⁸ La mayoría de estimaciones indican que la población mundial llegará a alcanzar un máximo y descenderá después, aunque sigue siendo muy incierto en qué momento sucederá. Las valoraciones actuales sobre la huella del uso de recursos indican que la población mundial está consumiendo por año el 50% más de recursos de los que el planeta puede reponer. Es probable que esta cifra siga subiendo de un modo pronunciado, más rápidamente que la población total. Según algunas estimaciones, si el humano medio utilizara tantos recursos como el estadounidense medio, la población mundial



estaría consumiendo recursos cuatro veces más rápido de lo que se pueden reponer. La inmensa mayoría de la población no consume alimentos, energía y agua, ni libera CO₂, al nivel del estadounidense medio. No obstante, el rápido crecimiento de una gran clase media en China está empezando a generar un consumo mucho mayor de recursos y unas emisiones de CO₂ muy superiores en esta región, y se prevé que el mismo fenómeno se reproduzca un poco más tarde en la India.

Cambio climático catastrófico

Sin un cambio de rumbo significativo en las emisiones de CO₂, el mundo va camino de un notable calentamiento global por causas humanas. De acuerdo con el último informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), se puede esperar un incremento de entre 2,5 y 7,8°C si seguimos comportándonos «como hasta ahora». La estimación mínima tendrá repercusiones negativas significativas, en particular para los países en vías de desarrollo, pero es poco susceptible de comportar una catástrofe mundial; sin embargo, la estimación máxima tendría sin duda consecuencias catastróficas a escala planetaria. El amplio rango entre ambas estimaciones refleja, en parte, la gran incertidumbre sobre la robustez del sistema climático ante el efecto «perturbador» de nuestras actividades. En especial, los científicos centrados en un cambio climático catastrófico están preocupados por un sinnúmero de posibilidades de realimentación. Por ejemplo, una reducción del territorio cubierto por nieve, que refleja la luz del sol, podría incrementar la tasa de calentamiento, lo que a su vez agravaría la reducción de superficie cubierta por la nieve. La pérdida de permafrost ártico podría generar la emisión de grandes cantidades de metano a la atmósfera, lo que a su vez podría agravar el efecto invernadero. Se desconoce en qué medida los océanos pueden seguir ejerciendo de «disipadores de calor» y «sumideros de carbono» si elevamos la concentración de CO₂ en la atmósfera. Los científicos teorizan sobre la existencia de «umbrales» que, una vez alcanzados, pueden desencadenar una transformación irreversible; por ejemplo, la caída de las capas de hielo del Antártico occidental, la fusión de los gigantescos glaciares de Groenlandia o un colapso de la capacidad de los océanos de absorber calor y CO₂. En efecto, más allá de un cierto punto se puede desencadenar un «efecto montaña rusa», en el cual un aumento de 3°C en la temperatura puede conducir rápida e irreversiblemente a 4°C de aumento y, a continuación, a 5°C.

Se han hecho progresos loables hacia una coordinación mundial para reducir las emisiones de carbono en el planeta, muy especialmente tras la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (2015). Hasta 174 países firmaron un acuerdo para lograr la neutralidad en la emisión de gases antropogénicos de efecto invernadero antes de acabar el siglo XXI y «tomar medidas» para limitar el incremento de temperatura a 1,5°C. Pese a ello, muchos expertos sostienen que dichos objetivos son poco realistas y que los compromisos y las medidas que se adoptan son insuficientes en comparación con lo que será necesario. De acuerdo con el director ejecutivo de la Agencia Internacional de la Energía, Fatih Birol, «consideramos que adolecemos de un gran retraso en tecnologías clave y que, en ausencia de un fuerte impulso gubernamental, estas tecnologías nunca se desplegarán en los mercados de la energía, de modo que las probabilidades de alcanzar el objetivo de 2°C son muy escasas».⁹



Erosión del suelo

La erosión del suelo es un proceso natural. Sin embargo, la actividad humana ha incrementado su magnitud de un modo espectacular a escala mundial, con la deforestación, la sequía y el cambio climático como aceleradores de la tasa de pérdida de suelo fértil. Hay razones para esperar que esta tendencia se acelere, puesto que uno de los factores más potentes de erosión del suelo lo constituyen los acontecimientos climáticos extremos, cuya frecuencia y gravedad se espera que aumenten a consecuencia del cambio climático.

Pérdida de biodiversidad

El mundo está entrando en una era de extinción de especies a pasos agigantados a causa de la actividad humana.¹⁰ Desde 1900 han estado desapareciendo especies de vertebrados a un ritmo más de 100 veces superior al observado en periodos de no extinción. Además del valor intrínseco de la diversidad de formas de vida sobre la Tierra (de acuerdo con los conocimientos actuales, el único planeta que alberga vida en el universo), los académicos que estudian el riesgo catastrófico están preocupados por sus consecuencias para las sociedades humanas. La resistencia de los ecosistemas es un fenómeno de enorme complejidad y parece plausible que responda a umbrales. Por ejemplo, la caída de una o más especies esenciales que fundamentan la estabilidad de un ecosistema puede derivar en un desmoronamiento más amplio del ecosistema, con consecuencias potencialmente devastadoras para la estabilidad del sistema humano (por ejemplo, la desaparición de algunas especies polinizadoras clave tendría consecuencias de gran calado para la agricultura). Hoy, la prosperidad humana depende en gran medida de los servicios que prestan estos ecosistemas, pero los estamos poniendo en peligro a un ritmo sin precedentes, al tiempo que adolecemos de una capacidad mínima de predecir las consecuencias de nuestra actividad.

Todo influye en todo

De nuevo, la gran complejidad e interconexión de estos riesgos representa un reto crucial. Ninguno de estos procesos es aislado, de modo que los cambios en uno influyen en los demás. El cambio climático afecta a los ecosistemas al forzar la migración de las especies (las que pueden), modificar los patrones de crecimiento de plantas y animales e impulsar la extinción de las especies. La reducción del suelo disponible nos obliga a penetrar más profundamente en el terreno natural no agrícola para conseguir la tierra cultivable que necesitamos para alimentar a nuestra población. Asimismo, los ecosistemas que ponemos en jaque desempeñan papeles importantes en el mantenimiento de un clima y un entorno estables. Conscientes de que no pueden obtener todas las respuestas necesarias sobre estas cuestiones analizándolas por separado, los académicos del riesgo catastrófico se centran en las amenazas que plantea precisamente la interacción de estos fenómenos como área de estudio fundamental.

Todos estos cambios tienen como resultado un mundo más incierto, el surgimiento de fuentes de vulnerabilidad enormes e impredecibles y la aparición de acontecimientos más extremos y sin precedentes. Estos acontecimientos se producirán en un mundo muy poblado que contiene más tecnologías poderosas (y más armas poderosas) de las que nunca han existido.



LA HUMANIDAD Y LA TECNOLOGÍA EN EL SIGLO XXI

Nuestro progreso científico y tecnológico, así como los correspondientes avances de la civilización, nos han permitido albergar a muchas más personas en este planeta y han proporcionado el poder necesario para que dichas personas influyan en su entorno más que cualquier especie anterior. Este progreso no es negativo de por sí, como tampoco lo es la magnitud de nuestra población mundial.

Hay buenas razones para pensar que, con una planificación cuidada, este planeta podría albergar a 7.000 millones o más de personas de un modo estable y cómodo.¹¹ Con unas prácticas agrícolas sostenibles y el uso innovador de métodos de riego, debería ser posible que muchas partes del mundo relativamente inhabitadas e improductivas desde el punto de vista agrícola proporcionaran sustento a más personas y produjeran más alimentos. Un crecimiento infinito de la población en un planeta finito no es posible sin un colapso. No obstante, el crecimiento hasta dicho punto no es en modo alguno inevitable. La estabilización de la magnitud de la población presenta una intensa correlación con varios factores en los que estamos progresando de un modo constante y a escala mundial: por ejemplo, la educación (en especial la de las mujeres) y los derechos, así como un mayor nivel de control de las mujeres sobre sus vidas. Pese a que muchos estudios discrepan,¹² son numerosos los expertos que afirman que reducir la mortalidad infantil, pese a generar un incremento de la población a corto plazo, conduce a una reducción en el crecimiento de la población a largo plazo. Dicho de otra manera, a medida que avancemos hacia un mundo mejor, ofreceremos un mundo más estable, siempre que las etapas intermedias del proceso no desencadenen un colapso o daños duraderos a escala mundial.^{13,14}

Los avances actuales en la ciencia y la tecnología, pese a que no bastan por sí solos, sí desempeñarán un papel clave a la hora de posibilitar un futuro más resistente y sostenible. Se está progresando con celeridad en las fuentes de energía neutrales en carbono, como la energía fotovoltaica solar y otras renovables.¹⁵ El almacenamiento de energía representa todavía un problema, pero se está progresando en la eficiencia de las baterías. Los avances en las técnicas de riego y en las tecnologías de desalinización pueden posibilitarnos el suministro de agua a zonas en las que hasta ahora no ha sido posible, lo que permitiría tanto la producción alimentaria como otros procesos que dependen de un acceso fiable a agua limpia. Los avances en la tecnología de materiales brindarán ventajas en un gran abanico de aplicaciones, desde vehículos más ligeros y eficaces en el consumo de energía hasta edificios y redes eléctricas más eficientes, pasando por herramientas científicas más potentes y ulteriores innovaciones tecnológicas. Los avances en nuestra comprensión de la genética de las plantas están propiciando cosechas más productivas, con una mayor resistencia a los cambios de temperatura, las sequías y otros fenómenos meteorológicos extremos, así como una mayor resistencia a las plagas, con la consiguiente reducción en la necesidad de pesticidas contaminantes. Es probable que seamos testigos de muchas más innovaciones en la producción de alimentos; por ejemplo, los interesantes avances en la carne producida en laboratorio pueden conducir a la producción de carne con una huella medioambiental significativamente menor que las explotaciones ganaderas.

El origen de muchos de los procesos que han desembocado en nuestras actuales trayectorias insostenibles se puede encontrar en la Revolución Industrial y en nuestra adopción generalizada de los combustibles fósiles. Sin embargo, hay que reconocer también





Con sus 537 m² de paneles solares y seis bloques de baterías de litio-ion, que permiten una velocidad de navegación récord, *PlanetSolar* es la mayor nave solar que existe y el primer barco que ha dado la vuelta al mundo impulsado por energía solar

que la Revolución Industrial y los combustibles fósiles han permitido un nivel de prosperidad y un ritmo y una escala de progreso científico y tecnológico que, sencillamente, habrían sido imposibles en su ausencia. Una dependencia continuada de los combustibles fósiles sería catastrófica para nuestro medioambiente. Sin embargo, muchos de los grandes avances en la «tecnología limpia» que nos permitirán superar dicha dependencia quizá no habrían sido posibles sin los grandes avances científicos que nos proporcionó, directa o indirectamente, esta fuente de combustible abundante y de fácil acceso. El objetivo está claro: tras habernos beneficiado tanto de esta fase «sucía» de la tecnología, es el momento de aprovechar la oportunidad que nos brinda para pasar a tecnologías de fabricación y energías de nueva generación más limpias y potentes. El desafío radicará en hacerlo antes de superar los umbrales que traerían consigo consecuencias irreversibles para el planeta.

El reto consiste en que la humanidad, como especie, necesita una transición a una fase de desarrollo tecnológico y cooperación mundial en la cual la especie humana «viva de acuerdo con sus posibilidades»: producir y consumir energía, agua, alimentos y otros recursos a un ritmo sostenible y mediante métodos que no tengan consecuencias negativas a largo plazo para nuestro hábitat planetario, al menos mientras tengamos que permanecer en él. No hay razones físicas para pensar que quizá en un futuro no seamos capaces de desarrollar una extensa civilización en el espacio. Asimismo, si pervivimos lo suficiente, es probable que desarrollemos una gran capacidad para modificar el terreno en entornos extraterrestres para hacerlo acogedor o, de hecho, que nos transformemos para adecuarnos a entornos ahora mismo hostiles. No obstante, hoy en día, como afirma Martin Rees, en nuestro sistema solar no hay ningún lugar tan hospitalario, ni de lejos, como el más hostil de los entornos terrestres, de modo que estamos atados a nuestro frágil planeta azul.

Parte de este desafío más general implica entender mejor las complejas consecuencias de nuestros actos y, todavía más, los límites de nuestro conocimiento actual. Aunque no podamos saberlo todo, reconocer en qué punto nuestra falta de certidumbre nos puede conducir a terrenos peligrosos puede contribuir a que demos con un conjunto prudente de «parámetros de funcionamiento seguro» (por citar *Planetary Boundaries*,¹⁶ de Steffen *et al.*) para nuestras actividades. La segunda parte del desafío, quizás aún más difícil, consiste en desarrollar el nivel de coordinación y cooperación mundial necesario para que se respeten estos parámetros de funcionamiento seguro.

Imponderables tecnológicos

Pese a que gran parte de la investigación del Centro para el Estudio del Riesgo Existencial (CSER, por sus siglas en inglés) se concentra en estos retos (el cambio climático, el consumo de recursos y la población, los riesgos ecológicos y la interacción entre estos), la otra mitad de nuestro trabajo trata de otra clase de factores: las tecnologías transformadoras, tanto emergentes como futuras, y los «comodines» o imponderables, avances tecnológicos lo bastante significativos como para cambiar por sí mismos el curso de la civilización humana. Las armas nucleares son uno de estos imponderables, ya que su desarrollo cambió la naturaleza de la geopolítica de un modo instantáneo e irreversible. También cambiaron la naturaleza del riesgo mundial; ahora muchas de nuestras causas de preocupación podrían aumentar con bastante rapidez por la actividad humana hasta el peor de los escenarios posibles, con un intercambio a gran escala de misiles nucleares. El escenario más preocupante en términos





de riesgo existencial es el que podría desencadenar un invierno nuclear: un nivel de destrucción suficiente para lanzar a la atmósfera enormes cantidades de materia en partículas y causar un periodo prolongado de oscuridad y frío en el planeta. De prolongarse demasiado, un periodo así desbarataría la producción alimentaria mundial y podría llevar a la especie humana a su práctica o total extinción. Los expertos no se ponen de acuerdo sobre la escala del intercambio nuclear necesario para desencadenar un invierno nuclear, pero todo apunta a que bastaría con el lanzamiento de los arsenales todavía existentes en el mundo.

Las armas nucleares se podrían considerar un comodín también en un sentido diferente: la ciencia en que se basan es la que permitió el desarrollo de la energía nuclear, una alternativa viable y neutra en carbono a los combustibles fósiles. Esta característica de *doble uso* —es decir, con unos fundamentos científicos aplicables a objetivos tanto destructivos como pacíficos— es común a muchas de las tecnologías emergentes que más nos interesan.

Las ciencias y tecnologías clave que centran la atención académica en esta área incluyen, entre otras:

Algunos temas de biociencia y bioingeniería, como la manipulación y la modificación de determinados virus y bacterias y la creación de organismos con características y capacidades nuevas (ingeniería genética y biología sintética).

La geoingeniería: la propuesta de un conjunto de intervenciones tecnológicas a gran escala que tendrían el propósito de «manipular» nuestro clima para ralentizar o incluso invertir los impactos más graves del cambio climático.

Los avances en la inteligencia artificial, en particular los relacionados con el progreso hacia una inteligencia artificial *general*, con sistemas de inteligencia artificial capaces de igualar o superar las capacidades intelectuales humanas en un amplio abanico de áreas y dificultades.

El progreso en estas ciencias está impulsado, en gran medida, por el reconocimiento de su potencial para mejorar nuestra calidad de vida o del papel que podrían desempeñar para ayudarnos a combatir los desafíos mundiales actuales o emergentes. Sin embargo, en sí mismos, estos avances también pueden plantear grandes riesgos.

Investigación sobre los virus

A pesar de los avances en la higiene, las vacunas y otras tecnologías de la salud, los estallidos epidémicos naturales siguen representando una de las amenazas mundiales más preocupantes; por ejemplo, el brote de gripe española de 1918 mató a más personas que la Primera Guerra Mundial. Esta amenaza es especialmente relevante en un mundo cada vez más poblado e interconectado como el nuestro. Es probable que los avances en la investigación virológica desempeñen un papel central en mejorar la protección y las respuestas ante los virus con potencial pandémico.

Una de las áreas de investigación más controvertidas es la investigación virológica sobre «ganancia de funciones», dedicada a modificar virus existentes para transformar su capacidad



de transmisión al huésped y dotarlos de otras características. Los investigadores que participan en esta área pueden ayudar a identificar cepas con un potencial pandémico elevado y desarrollar vacunas y tratamientos antivíricos. No obstante, la investigación con agentes infecciosos corre el riesgo de provocar una liberación accidental desde las instalaciones de investigación. Se ha sospechado de fugas de agentes infecciosos desde instalaciones de laboratorios. Son muchas las sospechas de que el brote de gripe ruso de 1977-1978 se originó por un incidente de fuga en laboratorio¹⁷ y, en el Reino Unido, el brote de fiebre aftosa se pudo haber originado en las instalaciones de investigación de enfermedades animales de Pirbright.¹⁸ La investigación sobre los agentes infecciosos vivos se suele efectuar en instalaciones regidas por los más rigurosos procedimientos de contención de bioseguridad, pero algunos expertos afirman que el potencial de liberación, pese a ser bajo, sigue existiendo y, en algunos casos, puede ser injustificable pese a los beneficios de la investigación.

Hay quien se inquieta porque los avances de alguna de las mismas ciencias que los sustentan puedan hacer más viable el desarrollo de nuevas armas biológicas de precisión. En 2001, un grupo de investigación de Australia diseñó de un modo inadvertido una variante de la ectromelia infecciosa de gran letalidad para los ratones vacunados.¹⁹ Una liberación accidental o deliberada de un virus modificado de un modo similar que infectara a los humanos o a especies de las que dependemos en gran medida podría tener consecuencias catastróficas.

De forma análoga, la biología sintética podría propiciar un amplio abanico de enormes beneficios científicos. Esta área tiene el objetivo de diseñar y construir nuevos componentes, dispositivos y sistemas biológicos y de rediseñar por completo algunos organismos vivos para que desempeñen funciones útiles para nosotros. Estos esfuerzos pueden desembocar en la creación de «microfactorías» bacterianas y vegetales sintéticas, diseñadas para producir nuevos materiales, medicinas y combustibles, descomponer los residuos y actuar como sensores, entre otras muchas cosas. En principio, estas biofactorías se podrían diseñar con una precisión muy superior a la de los enfoques biológicos y las modificaciones genéticas de la actualidad. Asimismo, deberían permitir la fabricación barata y limpia de productos. Estos avances tendrían un efecto transformador ante muchos de los retos que estamos afrontando a escala mundial; por ejemplo, en el cuidado sanitario, la energía y la manufactura.

A medida que se abaratan las herramientas e instalaciones necesarias para trabajar en la ciencia de la biología sintética, surge y se desarrolla una comunidad de «ciencia ciudadana» alrededor de esta disciplina. Las instalaciones comunitarias «DIY Bio» permiten a los particulares participar en nuevos proyectos artísticos y experimentos; algunos aficionados llevan a cabo proyectos de biología sintética incluso en casa. Gran parte de los líderes en esta área están comprometidos con el objetivo de una biología sintética tan abierta y accesible como sea posible en todo el mundo, que ponga a libre disposición de todos las herramientas

y el conocimiento científicos. Concursos como iGEM (certamen internacional de máquinas diseñadas genéticamente) alientan a equipos de estudiantes universitarios a construir y poner a prueba sistemas biológicos en células humanas, a menudo con una especial atención, por una parte, a aplicar la ciencia a desafíos importantes en la vida real y, por otra, a mantener registros de sus resultados y productos para ponerlos a disposición de los equipos futuros y contribuir a su labor.

Esta ciencia ciudadana representa un modo maravilloso de hacer que la ciencia puntera resulte accesible e interesante para generaciones enteras de innovadores. No obstante, la creciente facilidad de acceso a unas herramientas cada vez más poderosas es fuente de preocupación para la comunidad que estudia el riesgo. Pese a que la gran mayoría de personas que trabajan en la biología sintética son responsables y bienintencionadas, cabe la posibilidad de que haya actores perversos o de consecuencias inesperadas (como la liberación de un organismo con consecuencias ecológicas imprevistas). Además, podemos esperar que aumente la variedad y la gravedad de las consecuencias negativas, así como la dificultad para hacer un seguimiento de aquellos con acceso a las herramientas y los conocimientos necesarios. Hoy, la bioseguridad y la bioprotección están profundamente integradas en las principales iniciativas en biología sintética. En Estados Unidos, el FBI trabaja codo con codo con los centros de biología sintética y los líderes de la disciplina defienden la necesidad de buenas prácticas a todos los niveles. Con todo, esta área avanzará con rapidez y habrá que lograr un equilibrio entre poner herramientas poderosas a disposición de un gran número de personas que puedan usarlas para hacer el bien y restringir el potencial de accidentes o de un mal uso deliberado. Queda por ver hasta qué punto será fácil conseguirlo.

En cuanto a la geoingeniería, plantea numerosos retos. Por ejemplo, la ingeniería de aerosoles estratosféricos representa una propuesta especialmente potente: plantea la liberación de un flujo constante de aerosoles reflectores en la atmósfera superior para reducir la cantidad de luz solar total que alcanza la superficie terrestre. En efecto, se trata de una técnica que imita el fenómeno de enfriamiento mundial que se produce tras una gran erupción volcánica, cuando las partículas de materia son lanzadas a la atmósfera. Sin embargo, el trabajo actual se centra en el diseño de modelos teóricos y hasta la fecha las pruebas prácticas sobre el terreno han sido mínimas. Quedan por responder preguntas sobre la factibilidad de conseguir este efecto en la práctica y a escala planetaria y acerca de qué impacto tendría en los patrones de lluvia y el crecimiento de las cosechas.

Debemos destacar que esta no es una solución al cambio climático. Pese a que se podría estabilizar o reducir la temperatura del planeta, si esto no es acompañado también de una reducción en las emisiones de CO₂, seguiríamos sufriendo una serie de problemas, como la acidificación del océano. Por otra parte, si se permitiera mantener o incrementar las emisiones de CO₂ durante este periodo, se podría manifestar un riesgo de primer orden denominado «choque final». En este caso, si por cualquier circunstancia cesara de manera



abrupta la emisión de aerosoles estratosféricos por geoingeniería, la mayor concentración de CO₂ en la atmósfera generaría un aumento rápido de la temperatura del planeta, con unas consecuencias mucho más graves para los ecosistemas y las sociedades humanas que los efectos de un calentamiento gradual, ya de por sí desastrosos.

Los críticos de esta vía de investigación temen que se entienda, de un modo equivocado, como una manera de evitar el proceso mucho más costoso de eliminar las emisiones de carbono. Asimismo, algunos esgrimen que intervenir tan a fondo en el funcionamiento de nuestro planeta resulta del todo irresponsable. Estas iniciativas también suscitan cuestiones espinosas sobre la gobernanza mundial: ¿un país debería tener derecho a aplicar técnicas de geoingeniería? En caso contrario, si tenemos en cuenta que vivimos todos bajo un mismo cielo, ¿cómo se podría tomar una decisión coordinada a escala mundial (en especial si los diversos países presentan diferentes grados de exposición al impacto del cambio climático y diferentes niveles de preocupación por la geoingeniería)?

Los defensores de estas técnicas ponen el acento en que en la presente etapa quizá ya tengamos que sufrir efectos graves del cambio climático a escala mundial y que aquellas podrían otorgarnos la suficiente capacidad de maniobra para la transición hacia la tecnología neutral en carbono al tiempo que mitigan temporalmente los daños más graves. Además, a menos que se investigue para evaluar la factibilidad y el impacto probable de este enfoque, no estaremos en una buena posición para tomar una decisión informada en el futuro, cuando los efectos del cambio climático quizás exijan ya medidas extremas. Eli Kintisch, que escribe en *Science*, es conocido por definir la geoingeniería como «una mala idea cuyo momento ha llegado».²⁰

La inteligencia artificial, analizada en detalle en otros capítulos, puede representar el comodín más atrevido de todos. Todo lo que hemos logrado, en términos de progreso de la civilización y de adaptación del mundo que nos rodea a nuestros objetivos, ha sido el producto de nuestra inteligencia. No obstante, algunos de los retos intelectuales que afrontamos en el siglo XXI son precisamente aquellos que la inteligencia humana, por sí sola, no permite abordar de forma adecuada; por ejemplo, cribar enormes cantidades de datos e identificar patrones en ellos, así como integrar la información procedente de sistemas vastos e interconectados. Desde el análisis de fuentes dispares de datos climáticos, hasta el de millones de genomas humanos, pasando por la ejecución de miles de simulaciones, la inteligencia artificial (IA) contribuirá a nuestra capacidad para dar uso a una cantidad ingente de saber que podemos reunir y generar, además de ayudarnos a comprender nuestro mundo cada vez más complejo e interconectado. La IA ya se emplea para optimizar el consumo de energía entre los servidores de Google, reproducir intrincados experimentos de física y descubrir nuevas demostraciones matemáticas. Muchas tareas que tradicionalmente requerían la inteligencia humana, desde la traducción de lenguas hasta la conducción en carreteras concurridas, ahora se pueden automatizar, con el consiguiente incremento de la eficiencia y la productividad y de la liberación de inteligencia humana para las tareas que la IA todavía no puede hacer. Sin embargo, muchos de estos mismos avances tienen aplicaciones más preocupantes; por ejemplo, permitir la recogida y el análisis en profundidad de nuestros datos personales y sentar las bases para el desarrollo de armas autónomas baratas, potentes y fáciles de expandir destinadas al campo de batalla.

De hecho, estos avances ya tienen un impacto impresionante en nuestro mundo. Sin embargo, la gran mayoría de estos sistemas se pueden describir como IA «restringida». Pueden llevar a cabo funciones a un nivel igual o superior al humano en áreas limitadas y bien especificadas,



pero carecen de las capacidades cognitivas generales que tienen los humanos, los perros o incluso las ratas; entre otras, la capacidad general de resolver problemas en un contexto del «mundo real» y de aprender de la experiencia y aplicar el saber a nuevas situaciones.

Ha renacido el entusiasmo por el reto de lograr una IA «general», que podría tener un rendimiento igual o superior al humano en todo el rango de entornos y problemas cognitivos en los que los humanos pueden operar. Sin embargo, por el momento se desconoce cuánto nos falta para llegar a un gran logro científico como este o cuán difíciles serán los desafíos fundamentales para alcanzarlo, mientras que los expertos muestran una gran disparidad de opiniones al respecto. La única prueba de principio de la que podríamos partir sería el cerebro humano, pero necesitaremos décadas de avances antes de entender de un modo significativo el cerebro en un grado que nos permita reproducir sus funciones clave. Sin embargo, cuando se logre ese descubrimiento, si se logra, hay razones para pensar que el progreso desde una inteligencia general de nivel humano hasta una IA general superinteligente podría ser muy rápido.

Las mejoras en los componentes de *hardware* y *software* de la IA, así como las ciencias y tecnologías relacionadas, podrían llegar con rapidez con la ayuda de una IA general avanzada. Resulta incluso concebible que los sistemas de IA puedan lanzarse directamente a la investigación de alto nivel sobre IA, con lo que acelerarían el proceso al permitir ciclos de automejora. Un número creciente de expertos en IA temen que un proceso de este tipo pueda desembocar con rapidez en sistemas muy potentes e inasequibles al control humano; Stuart Russell lo ha comparado con una reacción nuclear en cadena.

La IA superinteligente tiene el potencial de permitir un progreso sin precedentes en la ciencia, la tecnología y los desafíos de nuestro mundo; parafraseando a los fundadores de Google DeepMind, si la inteligencia se puede «resolver», también se puede utilizar a su vez para resolver todo lo demás. Pese a todo, el riesgo de esta tecnología hipotética, ya sea por un uso deliberado o por circunstancias inesperadas fuera de control, podría ser superior al de cualquier tecnología de la historia humana. Si es plausible que se alcance este nivel tecnológico durante el presente siglo, en las décadas previas será necesario un grado elevado de investigación y planificación, tanto en el diseño técnico de dichos sistemas como en las estructuras de gobernanza alrededor de su desarrollo, para conseguir una transición deseable.

Predecir el futuro

Esta área también efectúa labores de exploración y previsión sobre temas más orientados al futuro; por ejemplo, los avances futuros en neurociencia y nanotecnología, los futuros experimentos en física y las tecnologías de fabricación que se plantean y que se podrían desarrollar en las próximas décadas, como la fabricación molecular. Pese a que estamos limitados en lo que podemos describir en detalle sobre los descubrimientos científicos futuros, a menudo es posible hacer un útil trabajo preliminar. Sin ir más lejos, podemos identificar avances que, en principio y de acuerdo con nuestro conocimiento actual de la ciencia correspondiente, deberían ser posibles. Asimismo, podemos descartar ideas que son pura «ciencia ficción» o lo suficientemente poco factibles para que, de momento, podamos dejarlas de lado sin dudar, así como aquellas que representan un nivel de avance que hace su consecución poco probable hasta dentro de muchas generaciones.

Si nos centramos en aquellas ideas cuyo desarrollo en el próximo medio siglo es plausible, podemos reflexionar sobre sus características subyacentes y sus posibles efectos sobre el



mundo, además de los principios generales que podríamos tener en cuenta en pos de la seguridad en su desarrollo y aplicación. Pese a que habría sido una tarea de locos intentar predecir todos los impactos de internet antes de 1960 o el desarrollo de las armas nucleares antes de 1945, sería sin duda posible desarrollar el pensamiento sobre las implicaciones posibles de una red mundial muy sofisticada de comunicaciones e intercambio de información, o de un arma con un enorme potencial destructivo.

Por último, si tenemos algunas ideas acerca de las posibles fuentes de avances transformadores, podemos trabajar en la investigación orientada al pronóstico y la planificación. De este modo podríamos ayudar a identificar: a) descubrimientos y avances que de otra forma resultarían poco relevantes pero que podrían señalar un progreso significativo hacia la consecución de una tecnología más transformadora y b) el umbral a partir del cual es probable que la dinámica mundial cambie de manera significativa (como el momento en el que el precio y el acceso a la energía fotovoltaica y el almacenamiento de electricidad lleguen a ser más asequibles que los de los combustibles fósiles).

Enfrentarnos a los límites de nuestro conocimiento

Una cuestión común a estos desafíos y tecnologías emergentes radica en que suele existir un elevadísimo nivel de incertidumbre científica y de desacuerdo entre los expertos. Es especialmente cierto en cuanto a las capacidades y los avances científicos futuros, las vías por las cuales los avances en un campo pueden influir en el avance en otros y los impactos y riesgos mundiales de los avances proyectados. Entre los temas de investigación en marcha en el CSER se encuentran las vías para obtener información útil a partir de un abanico de expertos con opiniones dispares; también los medios para lograr un progreso científico significativo ante nuestros desafíos cuando contamos con datos discontinuos o con pocos casos de estudio en los que basarnos o, incluso, cuando debemos caracterizar un acontecimiento totalmente carente de precedentes. Se podría tratar de un hipotético umbral ecológico, que de ser superado derivaría en una marcha irreversible hacia el colapso de un ecosistema crucial al completo. Asimismo, podría tratarse de un descubrimiento científico transformador, como el desarrollo de la IA general, cuando nuestra única referencia son las tendencias actuales en la capacidad de la IA, el *hardware* y las opiniones de expertos sobre problemas clave por resolver en este campo. No es realista esperar que podamos tener razón siempre o, ni siquiera, la mayoría de las veces. Debemos ser humildes, estar preparados para falsos positivos y ser capaces de identificar los objetivos prioritarios de la investigación a partir de señales muy tenues.

Con la consciencia de que hay límites en el nivel de detalle y de certeza que se pueden conseguir, esta labor a menudo se combina con el trabajo sobre los principios generales de la gobernanza científica y tecnológica. Por ejemplo, el trabajo en el apartado de «innovación responsable» se centra en el desafío de desarrollar una administración colectiva del progreso en la ciencia y la tecnología del presente, con la idea de conseguir unos buenos resultados en el futuro.²¹ Combina el pronóstico científico con procesos para implicar a actores esenciales en las fases adecuadas del desarrollo de una tecnología. Dichos actores podrían incluir, en diferentes etapas, a los científicos que toman parte en la investigación fundamental y la investigación aplicada, a los líderes del sector, a los investigadores dedicados a los riesgos, beneficios y demás impactos de una tecnología, a los patrocinadores, a los responsables de las políticas, a los reguladores, a las ONG y a los grupos de referencia, y aquellos particulares que utilizarán





«La gente siempre se afanaba para el día de mañana. Yo no creía en eso. Al mañana le traía sin cuidado.»

La carretera, novela que le valió al escritor estadounidense Cormac McCarthy el premio Pulitzer en 2007. En ella se basa el guión de la película homónima de John Hillcoat escrito por Joe Penhall



La carretera (2009), John Hillcoat

una tecnología o se verán afectados por su desarrollo. En el caso de las tecnologías con un papel potencial en un riesgo catastrófico a escala mundial, pueden afectar a la población de todo el planeta. Por consiguiente, las decisiones con consecuencias a largo plazo no pueden estar en manos de un pequeño grupo de personas, representar solo los valores de un pequeño subconjunto de individuos ni pasar por alto los impactos probables sobre la población mundial.

Ha habido varios ejemplos concretos y muy alentadores de esta colaboración y visión de futuro, en los cuales especialistas en un área científica, expertos interdisciplinarios y patrocinadores, entre otros, han cooperado para intentar guiar el desarrollo de una tecnología emergente, establecer normas éticas y prácticas de seguridad y analizar sus usos y abusos potenciales de un modo científicamente riguroso. En bioingeniería, la famosa conferencia de Asilomar en 1975 sobre el ADN recombinado sentó precedentes notables, mientras que en tiempos más recientes se han celebrado cumbres sobre avances como la edición de genes humanos. Sobre IA ha habido varias conferencias importantes en los últimos tiempos, con la participación entusiasta de líderes académicos e industriales de la investigación en IA junto a expertos interdisciplinarios y responsables políticos. Varios de los equipos de élite mundial en investigación sobre la IA han formado grupos asesores en ética para informar y guiar sus prácticas científicas. Asimismo, hace poco se ha anunciado la creación de una «Asociación para la IA en beneficio de las personas y la sociedad», de carácter intersectorial, y que incluye cinco empresas punteras en la investigación fundamental en la materia.²²

En términos más amplios, es crucial que aprendamos de las lecciones de las tecnologías del pasado y que, en la medida de lo posible, desarrollemos principios y metodologías que podamos emplear en un futuro. Esto nos podría dar ventaja a la hora de prepararnos para avances todavía fuera de nuestro alcance y que podrían verse imposibilitados si nos ciñéramos a metodologías demasiado ligadas a tecnologías y riesgos específicos. Una de las preocupaciones principales asociadas con los riesgos de las tecnologías emergentes y futuras es el ritmo de progreso y la aparición de las consiguientes amenazas relacionadas. Pese a que todas las ciencias plantearán retos específicos y requerirán técnicas y conocimientos de expertos concretos de cada área, debemos acoger con los brazos abiertos cualquier herramienta o metodología que nos ayude a intervenir de un modo fiable y más temprano. Es posible que la oportunidad de evitar dichos riesgos sea efímera. De hecho, dicha oportunidad se podría dar en las primeras fases de desarrollo de una tecnología, mucho antes de que esté madura y a disposición del mundo, cuando ya sea difícil de controlar. Una vez abierta, la caja de Pandora es difícil de cerrar.

TRABAJAR EN EL RELOJ (DEL JUICIO FINAL)



En la actualidad, el progreso tecnológico nos ofrece la visión de un futuro extraordinario. Los avances que nos han llevado a una trayectoria no sostenible también han incrementado de forma espectacular la calidad de vida de muchos y han abierto caminos científicos que nos pueden conducir, a su vez, a un mundo más seguro, limpio y sostenible. Con el desarrollo tecnológico adecuado y sus aplicaciones, conjugados con el avance de los procesos sociales, democráticos y distributivos a escala mundial, se puede progresar ante todos los desafíos analizados en el presente capítulo. Los avances en las energías renovables y las tecnologías

relacionadas, así como un consumo más eficiente de energía —avances que probablemente acelerará el progreso de tecnologías como la IA—, nos pueden conducir a la neutralidad en las emisiones de carbono. Las nuevas capacidades de fabricación que nos brinde la biología sintética pueden establecer vías más limpias para producir productos y procesar los residuos. Una mayor comprensión científica del mundo natural en el que vivimos y de los servicios que nos presta el ecosistema y de los que dependemos nos ayudará a marcar un rumbo que haga compatible la conservación de los sistemas medioambientales clave y la prosperidad humana. Incluso podemos contribuir a los avances en la educación y los derechos de las mujeres a escala mundial (que desempeñan un papel en la estabilización de la población) mediante las herramientas de educación, información y coordinación que nos proporciona la tecnología y, en términos más generales, por la creciente prosperidad en las zonas relevantes del mundo.

Existen riesgos catastróficos y existenciales que simplemente no podremos superar en ausencia de avances en la ciencia y la tecnología; por ejemplo, posibles brotes pandémicos, ya sean naturales o causados por el hombre. La identificación temprana de asteroides en trayectoria de impacto con la Tierra y las estrategias para desviarlos constituyen un tema de investigación activo tanto en la NASA como en otros ámbitos. Pese a que ahora mismo no se conocen técnicas para evitar o mitigar una erupción supervolcánica, puede que dentro de un siglo las herramientas a nuestra disposición sí nos lo permitan. De igual manera, a un plazo todavía más largo, una civilización que se haya diseminado permanentemente más allá de la Tierra, facultada para ello por los avances en el vuelo espacial, la manufactura, la robótica y la modificación del terreno, será una civilización mucho más susceptible de pervivir. Sin embargo, el sobrecogedor poder de las herramientas que estamos desarrollando no debe tomarse a la ligera. Hemos tenido la suerte de vivir la llegada de las armas nucleares sin sufrir una catástrofe global. Además, es realista esperar que, a lo largo del presente siglo, podamos reescribir gran parte de la biología para ajustarla a nuestros propósitos, intervenir deliberadamente y a gran escala en los mecanismos del clima de nuestro planeta e, incluso, desarrollar agentes con una inteligencia fundamentalmente ajena a la nuestra y que podría superarla en gran medida en algunas o la mayoría de áreas. Sería una evolución sin precedentes y con unas consecuencias impredecibles.

Da confianza observar que son relativamente escasos los acontecimientos que podrían causar una catástrofe existencial, es decir, una que desembocara en la extinción o el colapso permanente de la civilización. Dejando aparte los acontecimientos muy excepcionales (como los supervolcanes o los asteroides), los candidatos más plausibles a una catástrofe de este tipo incluyen el invierno nuclear, escenarios de calentamiento o enfriamiento extremo del planeta, la liberación deliberada o accidental de un organismo que alterara radicalmente el funcionamiento del planeta o la liberación de un patógeno de diseño. Asimismo, incluyen avances futuros que quedan en un terreno más especulativo, como nuevos tipos de armamento, una IA fuera de control o, quizá, experimentos de física más allá de lo que ahora mismo podemos prever. Muchos riesgos mundiales son aislados y no letales (al menos para algunos de nosotros), y es probable que la civilización humana pudiera recuperarse de ellos a largo plazo: un calentamiento global más leve, diversos desastres medioambientales y colapsos de ecosistemas, una hambruna generalizada, la mayoría de brotes pandémicos y la guerra por medios convencionales (aunque sea mundial).

No obstante, esta última categoría de riesgos, así como los factores que podrían impulsarlos (como la población, el consumo de recursos y el cambio climático), no deben ser ignorados





por el estudio del riesgo existencial en términos más generales. Tampoco tiene sentido considerar estos desafíos de forma aislada; en un mundo interconectado como el nuestro, influyen los unos en los otros. La amenaza de una guerra nuclear a escala mundial no ha desaparecido y muchos estudiosos consideran que puede volver a agravarse (al escribir el presente capítulo, Corea del Norte había llevado a cabo su prueba nuclear más ambiciosa hasta la fecha). Si la sequía, el hambre, las presiones climáticas y otras sobre los recursos sirven para generar una escalada en las tensiones geopolíticas o si el uso potencial de una nueva tecnología como la geoingeniería condujera a un enfrentamiento nuclear, el resultado sería una amenaza existencial.

Por todas estas razones, entre otras, se está desarrollando una comunidad de académicos de todo el mundo que consideran que el siglo XXI será el escenario de cambios y desafíos de mayor calado que cualquier siglo anterior en la historia humana. Será un siglo de presiones sin precedentes a escala mundial, un siglo en el cual es probable que la frecuencia de los acontecimientos extremos e impredecibles alcance unos niveles inéditos. Será, además, un siglo en el que el poder de unas tecnologías distintas a las conocidas en el pasado se cernirá sobre nuestras cabezas como múltiples espadas de Damocles. Con todo, será también un siglo en el cual las tecnologías que desarrollemos y las estructuras institucionales que creemos podrían ayudarnos a resolver muchos de los problemas que afrontamos en la actualidad; sobre la base, eso sí, de que orientemos con cuidado su uso y sus aplicaciones.

Durante este siglo deberemos, como especie, aprender a cooperar a una escala y en un nivel sin precedentes, tanto para evitar la posibilidad de un conflicto con las armas de cataclísmico poder que hemos desarrollado como para prevenir las dañinas consecuencias de nuestras actividades combinadas sobre el planeta. Asimismo, pese a que con las armas nucleares estuvimos a punto de caer a las primeras de cambio, tenemos razones para ser muy optimistas. Respecto al pasado, la amenaza que plantean ha conducido a un nivel muy superior y desconocido de cooperación internacional y a estructuras internacionales dedicadas a evitar la posibilidad de una guerra a gran escala. En un mundo exento de armas nucleares quizá ya habríamos sido testigos de una tercera guerra mundial. Por añadidura, los esfuerzos internacionales por mitigar el cambio climático han sentado un poderoso precedente. En diciembre de 2015, países de todo el mundo acordaron dar pasos significativos para reducir la probabilidad de un daño catastrófico global contra las generaciones futuras, aunque en muchos casos es posible que las medidas correspondientes choquen tanto con los intereses económicos individuales de estos países como con los intereses económicos de la generación actual. Con cada uno de estos pasos aprendemos más y reforzamos un poco más el andamiaje científico e institucional que necesitaremos para responder con eficacia a los retos por venir.

Si lo hacemos bien en este siglo, la humanidad tendrá un largo futuro en la Tierra y también en las estrellas.

NOTA DEL AUTOR

El trabajo de Seán Ó hÉigeartaigh cuenta con financiación de la Templeton World Charity Foundation. Las opiniones expresadas en este capítulo son las del autor y no reflejan necesariamente las opiniones de dicha fundación.



NOTAS

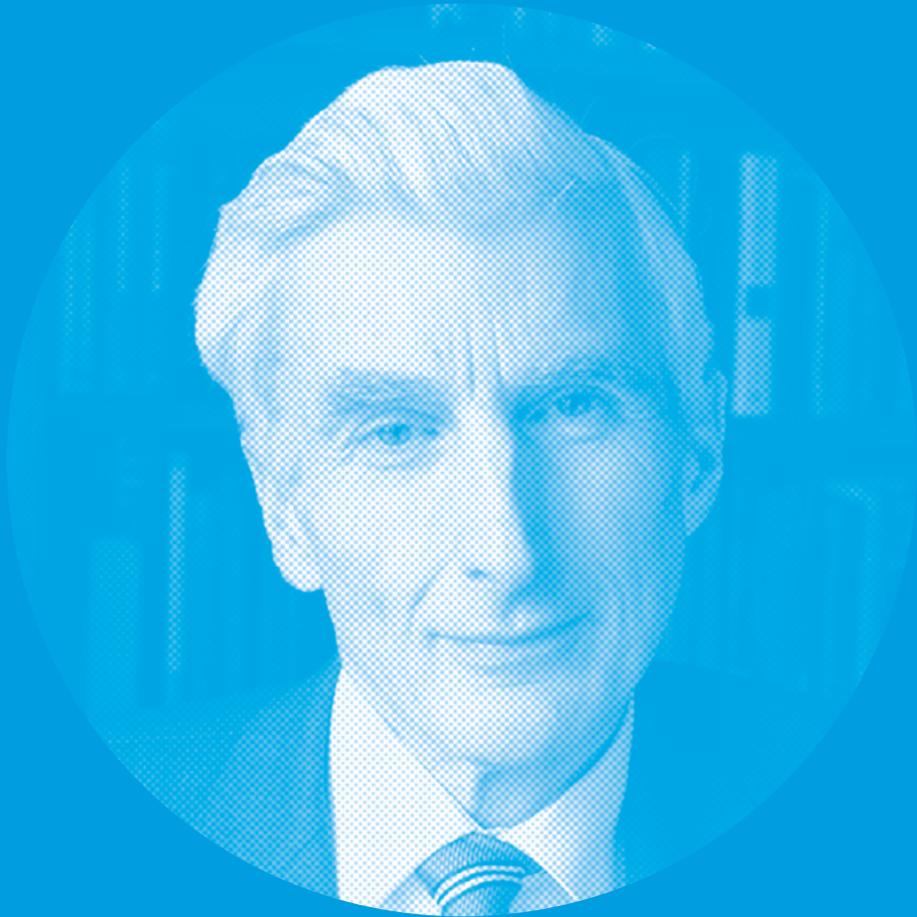
1. Garber, M., «The Man Who Saved the World by Doing Absolutely Nothing», en *The Atlantic*, 26 de septiembre de 2013. <http://www.theatlantic.com/technology/archive/2013/09/the-man-who-saved-the-world-by-doing-absolutely-nothing/280050/>
2. Lewis, P. M., Williams, H., Pélopidas, B. y Aghlani, S., *Too Close for Comfort: Cases of Near Nuclear Use and Options for Policy*, Londres, Chatham House, the Royal Institute of International Affairs, 2014.
3. Bostrom, N., «Existential Risks», en *Journal of Evolution and Technology*, vol. 9, n.º 1, 2002.
4. Jefferies, J., «The UK Population: Past, Present and Future», en *Focus on people and migration*, Reino Unido, Palgrave Macmillan, 2005.
5. Gates, B., «The Next Epidemic—Lessons from Ebola», en *New England Journal of Medicine*, vol. 372, n.º 15, 2015.
6. Farrar, J. J. y Piot P., «The Ebola Emergency—Immediate Action, Ongoing Strategy», en *New England Journal of Medicine*, vol. 371, n.º 16, 2014.
7. <http://slatestarcodex.com/2014/07/30/meditations-on-moloch/>
8. Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de las Naciones Unidas, *World Population Prospects: The 2015 Revision*, Nueva York, Naciones Unidas, 2015. https://esa.un.org/unpd/wpp/Publications/Files/Key_Findings_WPP_2015.pdf
9. <https://www.technologyreview.com/s/601601/six-months-after-paris-accord-were-losing-the-climate-change-battle/>
10. Ceballos, G., Ehrlich, P. R., Barnosky, A. D., García, A., Pringle, R. M. y Palmer, T. M., «Accelerated Modern Human-induced Species Losses: Entering the Sixth Mass Extinction», en *Science Advances*, vol. 1, n.º 5, 2015.
11. Ord, T., «Overpopulation or Underpopulation», en Goldin, I. (ed.), *Is the Planet Full?*, Oxford, Oxford University Press, 2014.
12. Shelton, J. D., «Taking Exception. Reduced Mortality Leads to Population Growth: an Inconvenient Truth», en *Global Health: Science and Practice*, vol. 2, n.º 2, 2014.
13. <https://www.givingwhatwecan.org/post/2015/09/development-population-growth-and-mortality-fertility-link/>
14. Gates, B., «3 Myths that Block Progress for the Poor», en *Gates Foundation*, Carta Anual, 22 de enero de 2014. <http://www.gatesfoundation.org/Who-We-Are/Resources-and-Media/Annual-Letters-List/Annual-Letter-2014>
15. King, D., Browne, J., Layard, R., O'Donnell, G., Rees, M., Stern, N. y Turner, A., «A global Apollo Programme to Combat Climate Change», en *London School of Economics and Political Science*, Londres, Centre for Economic Performance, 2015. <http://www.globalapolloprogram.org/>
16. Steffen, W., et al., «Planetary Boundaries: Guiding Human Development on a Changing Planet», en *Science*, vol. 347, n.º 6.223, 13 de febrero de 2015.
17. Rozo, M. y Gronvall, G. K., «The Reemergent 1977 H1N1 Strain and the Gain-of-Function Debate», en *mBio*, vol. 6, n.º 4, 2015.
18. Pennington, T. H., «Biosecurity 101: Pirbright's Lessons in Laboratory Security», en *BioSocieties*, vol. 2, n.º 4, diciembre de 2007, pp. 449-453.
19. Selgelid, M. J., Weir, L., Jackson, R. y Ramshaw, I., «The Mousepox Experience», en *EMBO Reports*, vol. 11, n.º 1, enero de 2010, pp. 18-24.
20. <https://www.wired.com/2010/03/hacktheplanet-ga/>
21. Stilgoe, J., Owen, R. J. y Macnaghten, P., «Developing a Framework for Responsible Innovation», en *Research Policy*, vol. 42, n.º 9, Elsevier, 2013, pp. 1.568-1.580.
22. <http://www.partnershiponai.org/>



Viajes interestelares y poshumanos

MARTIN REES

Imagen de apertura:
Las galaxias Antennae, situadas a
alrededor de 62 millones de años luz de
la Tierra, deben su nombre a los largos
brazos en forma de antenas que se
aprecian en los planos generales



Martin Rees
Institute of Astronomy, Cambridge, Reino Unido

Martin Rees es cosmólogo y científico espacial. Ha hecho importantes aportaciones al conocimiento de las estrellas, los agujeros negros, la evolución de las galaxias, el Big Bang y el multiverso. Vive en Cambridge, donde ha sido director del Institute of Astronomy y catedrático de investigación y rector del Trinity College. Entre 2005 y 2010 fue presidente de la Royal Society. Desde 2005 es miembro de la Cámara de los Lores británica. Sus libros incluyen *Before the Beginning*, *Our Final Century*, *Seis números nada más*, *Our Cosmic Habitat*, *Gravity's Fatal Attraction* y *From Here to Infinity: Scientific Horizons*, una versión aumentada de sus conferencias Reith de la BBC. Próximamente publicará *What We Still Don't Know*.

La Tierra existe desde hace 45 millones de siglos y transcurrirán aún más antes de que el Sol muera. Pero incluso con esta inmensa perspectiva temporal, el siglo actual es único. Puede que sea el primero en el que los seres humanos establezcan contacto con comunidades en lugares distantes de la Tierra. También en el que quizá creen inteligencias electrónicas que sobrepasen sus propias capacidades generales y logren tener hijos mediante bioingeniería. Este capítulo aborda algunos aspectos de esta transición y propone reflexiones de naturaleza más especulativa sobre la evolución «poshumana» y el futuro del universo.

INTRODUCCIÓN

Los astrónomos como yo nos dedicamos profesionalmente a pensar en enormes magnitudes de espacio y tiempo. Vemos nuestro planeta en un contexto cósmico. Nos preguntamos si hay vida en algún otro lugar del cosmos. Pero lo más importante es que somos conscientes del inmenso futuro que nos espera, un porvenir poshumano en el que nuestros descendientes podrán algún día trascender las limitaciones humanas aquí en la Tierra pero, más probablemente, fuera de ella. Ese es el tema del presente artículo.

Los largos periodos de tiempo del pasado evolutivo son ahora parte del saber común. Pero los horizontes temporales lejanos que se extienden ante nosotros, aunque conocidos por todos los astrónomos, no han calado en nuestra cultura en la misma medida. Nuestro Sol aún no ha alcanzado la mitad de su vida. Se formó hace 4.500 millones de años, pero le quedan otros 6.000 antes de quedarse sin combustible. Entonces estallará, engullirá los planetas interiores y destruirá toda la vida que pudiera quedar en la Tierra. Pero incluso después de la desaparición del Sol, el universo seguirá expandiéndose, tal vez para siempre, destinado a convertirse en un lugar cada vez más frío y desierto.

Las criaturas que presencien la extinción del Sol dentro de 6.000 millones de años no serán humanas, serán tan diferentes de nosotros como nosotros lo somos de los insectos. La evolución poshumana podría prolongarse tanto como la darwiniana de la que somos producto y, lo que es más fascinante, se trasladará hasta mucho más allá de la Tierra, a las estrellas incluso. Esta conclusión es evidente si pensamos que la evolución futura no se dará en la escala temporal de millones de años propia de la selección darwiniana, sino a un ritmo mucho más acelerado, producto de la modificación genética y los avances en inteligencia artificial (y forzado por los drásticos desafíos medioambientales a los que harán frente los



humanos que tengan que construir sus hábitats lejos de la Tierra). Es posible que la selección natural se haya ralentizado: los países civilizados han logrado atenuar sus efectos negativos. Pero será sustituida por la evolución «dirigida». Los fármacos que mejoran el rendimiento, la modificación genética o la tecnología de los cibernéticos están cambiando la naturaleza humana y no son más que la antesala de cambios mucho más profundos.

Darwin ya señaló que «ninguna especie viva se parecerá a sí misma en un futuro distante». Ahora sabemos que ese «futuro» se prolonga mucho más allá y que las alteraciones de las especies pueden producirse mucho más rápido de lo que pronosticó Darwin. Y sabemos que el cosmos, por el cual puede propagarse la vida, ofrece un hábitat mucho más extenso y variado de lo que jamás se habría imaginado. Sin duda, los humanos no son la rama definitiva de un árbol evolutivo, solo una especie surgida en una fase temprana en la sucesión temporal de especies, con aptitudes concretas para una evolución diversificada, y tal vez de importancia cósmica, como punto de partida de una transición hacia entidades basadas en el silicio (y potencialmente inmortales), que puedan trascender las limitaciones humanas con mayor facilidad.

UN SIGLO ESPECIAL

Llevamos casi cincuenta años tomando fotografías de la Tierra desde el espacio. En ellas se ve cómo su frágil biosfera contrasta con el estéril paisaje lunar que pisaron los astronautas. Estas fotos se han vuelto icónicas, sobre todo para los ecologistas. Pero supongamos que unos alienígenas llevaran observando la Tierra desde que existe: ¿qué habrían visto?

Durante casi toda esa inmensidad temporal de 4.500 millones de años, el aspecto de la Tierra habría ido cambiando de forma muy gradual. Los continentes se desplazaron; la capa de hielo creció y menguó; aparecieron, evolucionaron y se extinguieron sucesivas especies. Pero durante una mínima fracción de la historia de la Tierra —una millonésima parte, los últimos pocos miles de años—, las pautas de vegetación se alteraron a mucha mayor velocidad. Esto señaló el comienzo de la agricultura. El ritmo de los cambios se aceleraba a medida que crecían los asentamientos humanos. La «huella» de la humanidad se hizo mayor porque nuestra especie empezó a exigir más recursos, y también por el aumento demográfico.

En un lapso de cincuenta años —poco más de la centésima parte de una millonésima de la edad de la Tierra—, el dióxido de carbono en la atmósfera se ha incrementado de un modo anormalmente rápido. Y ha ocurrido algo más que tampoco tenía precedentes: los vehículos espaciales lanzados desde la superficie del planeta han abandonado por completo la biosfera. Algunos han sido enviados para orbitar alrededor de la Tierra, otros han viajado hasta la Luna y los planetas.

Si supieran de astrofísica, los extraterrestres predecirían, sin miedo a equivocarse, que la biosfera desaparecerá dentro de unos miles de millones de años, cuando el Sol se extinga y muera. ¿Pero podrían haber previsto esta «fiebre» repentina en el ecuador de la vida de la Tierra, estas alteraciones provocadas por los humanos con una duración total inferior a una millonésima parte del tiempo que la Tierra lleva existiendo y que aparentemente se están produciendo a una velocidad vertiginosa?

Si los extraterrestres siguieran observando, ¿qué presenciarían en los próximos cien años? ¿Una convulsión seguida de silencio? ¿Una transición del planeta a la sostenibilidad?

Y, lo más importante de todo para el futuro a largo plazo: ¿una misión espacial habrá partido de la Tierra y establecido nuevas comunidades en otros lugares, en Marte y sus lunas, en algún asteroide o flotando libremente en el espacio?

Vivimos una época decisiva. Nuestra Tierra lleva 45 millones de siglos existiendo y le quedan muchos más. Pero este siglo puede ser crucial. Es el primero en la historia de nuestro planeta en el que una especie (la nuestra) tiene el futuro de la Tierra en sus manos gracias al poder que nos dan unas tecnologías que avanzan a velocidad de vértigo. Tenemos derecho a sentirnos especialmente importantes, al ser la primera especie con el poder (y la responsabilidad) de moldear su propio futuro, y tal vez el futuro de la inteligencia en el cosmos.

TECNOLOGÍAS CLAVE

En lo que queda de siglo, tres nuevas tecnologías serán determinantes: la biotecnología avanzada, la inteligencia artificial (y la posibilidad de mejorar los cibernéticos) y la capacidad para explorar el espacio. Todas ellas se desarrollan tan rápido que no podemos predecir con seguridad ni siquiera lo que pasará cuando termine el presente siglo. Debemos estar abiertos a avances transformadores que hoy pueden parecerse ciencia ficción. Después de todo, el *smartphone*, la web y sus derivados ya están instalados en nuestras vidas, pero habrían parecido cosa de magia hace solo veinte años.

En el campo de la biología, pasaron cincuenta años desde el descubrimiento de la doble hélice por Crick y Watson hasta que se secuenció el genoma humano. Y en solo una década, el coste de cada una de estas secuenciaciones se ha dividido por diez mil. Las nuevas técnicas de edición de genes (por ejemplo, CRISPR), y los llamados experimentos «de incremento de función» (*gain of function*) que permiten obtener virus más agresivos o transmisibles, ofrecen grandes esperanzas. Pero también plantean nuevos dilemas éticos y grandes temores ante su uso inadecuado, porque los conocimientos necesarios estarán al alcance de muchos (el *biohacking* ya es una actividad competitiva entre los estudiantes). El físico Freeman Dyson ya anuncia un tiempo en el que los niños serán capaces de diseñar y crear nuevos organismos de manera tan rutinaria como los de su generación cuando se entretenían con juegos de química. Es un panorama de lo más apasionante (sobre todo si algún día queremos «reverdecer» hábitats extraterrestres con plantas), pero que tiene su lado negativo, la amenaza del bioerror o del uso del bioterror. Si «jugar a ser Dios en la mesa de la cocina» (por así decirlo), se convierte en una posibilidad real, hay probabilidades de que nuestra ecología, e incluso nuestra especie, no salgan indemnes.

¿Y qué decir de la segunda tecnología transformadora: la robótica y la inteligencia artificial? Todos estamos familiarizados con las drásticas consecuencias que prevé la ley de Moore ante los continuos avances en el diseño de ordenadores y el procesamiento de datos. Es cierto, los avances en inteligencia artificial han pasado por «falsos amaneceres» seguidos de periodos de desánimo. Ahora, no obstante, viven una fase de euforia debida en parte a los impresionantes avances en el denominado aprendizaje generalizado de las máquinas. DeepMind (una pequeña empresa londinense recientemente adquirida por Google) consiguió una hazaña notable a principios de 2016 cuando su ordenador derrotó al campeón mundial del juego de mesa de origen chino Go.

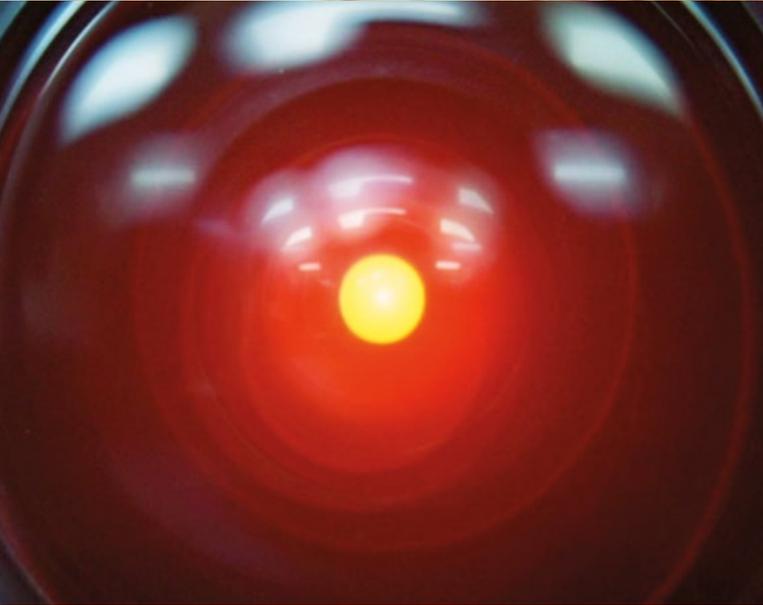




«La única manera de descubrir los límites de lo posible es aventurarse un poco más allá de dichos límites, en lo imposible.»

ARTHUR C. CLARKE (1917-2008)

Escritor británico. La cita es la segunda ley de Clarke, publicada en el ensayo «Peligros de la profecía: la falta de imaginación», *Perfiles del futuro* (1973). Es autor de la novela *2001: una odisea del espacio* (1968), que escribió en paralelo al rodaje de la película. Se publicó tras el estreno





Claro que hace ya veinte años que Deep Blue de IBM venció a Kaspárov, campeón mundial de ajedrez. Pero Deep Blue había sido programado en detalle por jugadores expertos. En cambio, la máquina jugadora de Go aprendió absorbiendo enormes cantidades de partidas y jugando contra sí misma una y otra vez. Ni siquiera quienes la diseñaron saben cómo toma la máquina sus decisiones.

Los ordenadores usan métodos de «fuerza bruta» y los avances en la potencia de los procesadores son los que han hecho posible el «despegue» generalizado del aprendizaje de las máquinas. Los ordenadores aprenden a identificar perros, gatos y rostros humanos «digiriendo» millones de imágenes, y no de la manera en que aprenden los bebés. Las máquinas aprenden a traducir después de leerse millones de páginas de, por ejemplo, documentos multilingües de la Unión Europea (¡y no se aburren!).

Pero los avances son discontinuos. Los robots siguen siendo más torpes que un niño a la hora de mover las piezas de un ajedrez real. No pueden anudar los cordones de los zapatos ni cortar a alguien las uñas de los pies. En cambio, la tecnología de sensores, el reconocimiento de voz, las búsquedas de información y otras están avanzando con rapidez. De momento no pueden hacerse cargo de un trabajo manual (de hecho, la fontanería y la jardinería estarán entre los trabajos más difíciles de automatizar), pero sí asumir tareas administrativas rutinarias (traspasos de titularidad de propiedades y cosas por el estilo), diagnósticos médicos e incluso operaciones quirúrgicas.

La gran pregunta social y económica es: ¿será esta «segunda era de las máquinas» similar a otras revoluciones tecnológicas anteriores, como el invento del automóvil, por ejemplo, y creará tantos empleos como destruye? ¿Es diferente esta vez? Son cuestiones tan acuciantes que están ya en la agenda política.

Pero sigamos con las conjeturas. Si los robots llegaran a ser menos torpes y limitados, acabarían por observar, interpretar y alterar su entorno tan eficazmente como nosotros. Entonces serían considerados, y con motivo, seres inteligentes, con los que podríamos relacionarnos. Estas máquinas están instaladas ya en el imaginario popular, en películas como *Her*, *Transcendence* y *Ex Machina*. ¿Tenemos obligaciones respecto a ellas? Nos preocupa que nuestros congéneres humanos e incluso los animales no puedan desarrollar su potencial natural. ¿Deberíamos sentirnos culpables, por tanto, si nuestros robots están frustrados, desaprovechados o aburridos?

Aún falta mucho antes de que nos tengamos que enfrentar a estos problemas. Como indicación de la brecha que aún queda por salvar, el ordenador jugador de Go probablemente consumiría varios cientos de kilovatios durante una partida. El cerebro del campeón humano, que, desde luego, puede hacer muchas otras cosas aparte de jugar a un juego, consume unos 30 kilovatios, más o menos lo que una bombilla.

Existen discrepancias acerca de la ruta a seguir para alcanzar un nivel de inteligencia humano. Unos opinan que debemos emular la naturaleza y aplicar ingeniería inversa al cerebro humano. Otros dicen que eso es tan disparatado como tratar de diseñar máquinas voladoras imitando el movimiento de las alas de los pájaros. Y los filósofos debaten si la «consciencia» es o no exclusiva del «*hardware* orgánico» de los cerebros de humanos, simios y perros, y que, de ser así, los robots, por muy superhumanos que parezcan sus intelectos, nunca tendrán consciencia de sí mismos ni vida interior.

Sea como sea, algún día pueden darse escenarios en los que robots autónomos «se rebelen», en los que un «superordenador» ofrezca a su controlador el dominio de la economía



internacional o en el que una red desarrolle una mente propia. Si pudiera infiltrarse en internet (y en la pujante internet de las cosas), podría manipular al resto del mundo. Puede tener intereses totalmente ajenos a los deseos humanos o incluso considerarlos una carga.

Algunos gurús de la inteligencia artificial se toman esto muy en serio y creen que es necesario regular este campo ya, al igual que en biotecnología. En cambio, otros consideran prematuros estos temores y les preocupa menos la inteligencia artificial que la estupidez real. Sea como fuere, es muy probable que, antes de que termine este siglo, robots autónomos hayan transformado la sociedad, aunque todavía no exista consenso sobre si serán «sabios tontos» o tendrán ya habilidades sobrehumanas.

En la década de 1960, el matemático británico I. J. Good señaló que si el hombre consiguiera inventar un robot superinteligente (si es suficientemente versátil) no necesitaría inventar nada más. Una vez que las máquinas superaran las capacidades humanas, ellas mismas podrían diseñar y crear una nueva generación de robots aún más inteligentes, así como una serie de constructores robóticos con capacidad de transformar el mundo físicamente.

Tecnovangelistas como Ray Kurzweil, quien actualmente trabaja en Google, predicen que las máquinas inteligentes «tomarán el relevo» en un plazo de cincuenta años, desencadenando una transformación global: la denominada «singularidad tecnológica». Para que esto suceda, no basta con potentes procesadores; los ordenadores precisarán sensores que les permitan ver y oír como nosotros, y el *software* adecuado para procesar e interpretar lo que les transmiten dichos sensores. Kurzweil cree que los humanos podrían trascender la biología, fusionándose con ordenadores. Dicho en jerga espiritista, se «pasarían al otro lado».

Pocos dudan de que las máquinas poco a poco irán superando cada vez más nuestras habilidades distintivamente humanas, o que las perfeccionarán mediante la tecnología cibernética. Las discrepancias se centran básicamente en la escala temporal, es decir, en la velocidad de progreso, no en su dirección. Algunos creen que habrá una «eclosión de inteligencia» durante este siglo. Los más cautos opinamos que estas transformaciones pueden demorarse siglos.

Pero varios siglos son un instante comparados con la escala temporal de la selección darwiniana que condujo al nacimiento de la humanidad. Y, lo que es más importante, supone menos de una millonésima parte del tiempo que tenemos por delante. Así pues, creo que se trata de un futuro a largo plazo.

Existen límites químicos y metabólicos en cuanto al tamaño y el poder de procesamiento del *hardware* de nuestro cerebro orgánico. Es posible que los humanos estemos ya cerca de alcanzar nuestros límites. En cambio, los ordenadores electrónicos carecen de dichas limitaciones (y los ordenadores cuánticos quizá aún

menos). Para ellos, el potencial de desarrollo podría ser tan asombroso como lo fue la evolución de los humanos a partir de organismos monocelulares. Sea cual sea la definición que demos de «pensamiento», la cantidad e intensidad de la actividad de la que son capaces los cerebros orgánicos de tipo humano quedará completamente eclipsada por la actividad mental de la inteligencia artificial. Es más, la evolución hacia una complejidad cada vez mayor se dará a una escala de tiempo tecnológica, mucho más veloz que la lenta selección darwiniana que ha marcado la evolución en la Tierra hasta ahora.

Esta inteligencia poshumana seguramente se extenderá mucho más allá de la Tierra. Por eso, ahora hablaré de las perspectivas de la tecnología espacial. Este es un terreno en el que, a pesar de los vuelos espaciales humanos, los robots ya son protagonistas.

EL FUTURO DE LA TECNOLOGÍA ESPACIAL

En los dos últimos años hemos visto la nave espacial Rosetta de la ESA (Agencia Espacial Europea) depositar un robot en la superficie de un cometa. Y la sonda New Horizons de la NASA nos ha enviado espectaculares imágenes de Plutón, que está diez mil veces más lejos que la Luna. Estos dos instrumentos fueron diseñados y construidos hace quince años, se necesitaron cinco años para su construcción y diez para que llegaran a sus remotos destinos. Imaginen cómo podríamos mejorar esto hoy en día.

Voy a aventurar la previsión de que, a lo largo de este siglo, flotillas de pequeñas naves robóticas explorarán y cartografiarán la totalidad del sistema solar (planetas, lunas y asteroides). El paso siguiente será la minería y fabricación en el espacio. (Y fabricar en el espacio es hacer un uso eficaz de los materiales extraídos de los asteroides en lugar de traerlos de vuelta a la Tierra.) Todo objeto hecho por el hombre que hay ahora mismo en el espacio ha tenido que ser enviado desde la Tierra. Pero, a medida que avance el siglo, gigantescas fábricas robóticas serán capaces de instalar enormes placas solares y desmesuradas redes informáticas en el espacio. Los sucesores del telescopio Hubble, con enormes y delgadísimos espejos ensamblados en condiciones de gravedad cero, ampliarán aún más nuestra visión de las estrellas, las galaxias y la inmensidad del cosmos.

¿Pero qué papel desempeñarán los humanos? No se puede negar que el robot Curiosity de la NASA, que ahora avanza a trompicones entre los cráteres marcianos, podría detectar descubrimientos sorprendentes que quizá no pasarían desapercibidos para un geólogo humano. Pero las técnicas robóticas avanzan deprisa, lo que permite construir sondas no tripuladas cada vez más sofisticadas, mientras que la diferencia de costes entre misiones tripuladas y no tripuladas sigue siendo inmensa. La necesidad práctica de que los vuelos espaciales sean tripulados disminuye a medida que avanzan la robótica y la miniaturización



(yo mismo, como científico y hombre práctico, apenas veo utilidad en enviar personas al espacio), aunque como ser humano soy un entusiasta de las misiones tripuladas. Y tengo edad suficiente para revivir la emoción que me produjeron el programa Apolo y el «pequeño paso» que dio Neil Armstrong en la superficie lunar allá por 1969. Los últimos hombres que pisaron la Luna regresaron en 1972. Desde entonces, centenares de humanos han ido al espacio, pero solo a orbitar alrededor de la Tierra, a unos cientos de kilómetros de la superficie, y muchos de ellos en la costosísima, pero aburrida, Estación Espacial Internacional.

Espero que personas que hoy están vivas lleguen a poner un pie en Marte, como aventura y como un paso más hacia las estrellas. Puede que sean los chinos: China cuenta con recursos, un gobierno dirigista y tal vez la voluntad de embarcarse en un programa tipo Apolo. Y China tendría que intentar ir a Marte, no solo a la Luna, si quiere consolidar su estatus de superpotencia con una «hazaña espacial». Limitarse a continuar lo que Estados Unidos consiguió hace cincuenta años antes no le bastaría para ponerse a su altura.

A menos que las motive el mero prestigio y estén financiadas por superpotencias, las misiones tripuladas más allá de la Luna tendrán que ser empresas de presupuesto reducido, dispuestas a asumir altos riesgos, quizá incluso «viajes solo de ida». Estas misiones tendrán financiación privada, ya que ninguna agencia gubernamental occidental expondría a civiles a semejantes peligros. A pesar de los riesgos, seguro que habría muchos voluntarios, impulsados por los mismos motivos que en su día animaron a los primeros exploradores, a los montañeros, etcétera. Ya existen empresas privadas que ofrecen vuelos orbitales. Aventureros ricos reservan viajes de una semana de duración a la cara oculta de la Luna en los que se alejarán de la Tierra más de lo que nadie haya hecho antes (pero evitando el riesgo que supone alunizar y tener que despegar después). He sabido que se ha vendido un billete para el segundo vuelo, pero ninguno para el primero. Y es posible que Dennis Tito, exastronauta y empresario, que planea enviar gente a Marte y traerla sin posarse en la superficie, no esté tan loco. Supondría pasar 500 estresantes días metidos en una cápsula espacial. La tripulación ideal sería una pareja estable de mediana edad, lo bastante mayor para asumir altas dosis de radiación. Y hay otro proyecto que permitiría apearse en Marte, pero para quedarse, sin viaje de vuelta.

Tal vez debamos aplaudir estas iniciativas privadas en el espacio, puesto que pueden asumir riesgos que un gobierno occidental no podría permitirse en proyectos financiados con dinero público y, por eso, sus costes serían más reducidos que los de la NASA o la ESA. Eso sí, estas iniciativas deben ser anunciadas como aventuras o deportes extremos, evitando la expresión «turismo espacial», que infunde en el público una confianza muy poco realista.

Para 2100, valerosos pioneros del talante de, por ejemplo, Felix Baumgartner, que rompió la barrera del sonido lanzándose en caída libre desde un globo a gran altitud, pueden haber establecido «bases» independientes de la Tierra, en Marte o quizá en algún asteroide. El propio Elon Musk, de cuarenta y cinco años, dice que quiere morir en Marte, pero no de un impacto. El desarrollo de comunidades autosuficientes en lugares muy lejos de la Tierra también aseguraría la supervivencia de formas de vida avanzadas, incluso en el caso de que nuestro planeta sufriera la peor de las catástrofes.

Pero no se prevé una emigración masiva desde la Tierra. No hay ningún lugar en nuestro sistema solar que ofrezca un entorno habitable, comparable siquiera a la Antártida o la cima del Everest. Pensar que el espacio es la solución a los problemas de la Tierra es una fantasía peligrosa. No existe el «planeta B».



El satélite artificial Kepler debe su nombre a Johannes Kepler. Su misión consistió en la búsqueda de planetas extrasolares. Fue lanzado desde Cabo Cañaveral en la madrugada del 6 de marzo de 2009. La misión se dio por concluida cuatro años más tarde, el 15 de agosto de 2013

De hecho, el espacio es un entorno inherentemente hostil para los humanos. Por ese motivo, aunque nos interese regular la tecnología genética y cibernética en la Tierra, a los pioneros del espacio en el uso de todas esas técnicas de adaptación a diferentes atmósferas, diferentes gravedades, etcétera, simplemente deberíamos desearles buena suerte. El suyo podría ser el primer paso hacia la diferenciación en una nueva especie: el comienzo de la era poshumana.

La exploración humana quedará restringida a los planetas y lunas de nuestro sistema solar. La razón es que el tiempo de tránsito a otras estrellas usando las tecnologías conocidas excede la esperanza de vida de los humanos, y así va a seguir siendo, aunque se puedan llegar a desarrollar futuristas formas de propulsión, mediante el uso de energía nuclear, aniquilación partícula-antipartícula o presión generada por gigantes rayos láser. Los viajes interestelares, excepto para sondas no tripuladas, muestras de ADN, etcétera, por tanto, son una empresa para poshumanos. Podrían ser criaturas orgánicas (o cibernéticas) que hubieran ganado la batalla a la muerte o perfeccionado las técnicas de hibernación o animación suspendida. Un viaje de miles de años es pan comido si eres un ser semiinmortal y no estás limitado a una vida de duración humana.

Y las máquinas de inteligencia humana podrían prosperar aún más. En efecto, la biosfera de la Tierra, en la que la vida orgánica ha evolucionado simbióticamente, no es esencial para una inteligencia artificial avanzada. De hecho, está lejos de ser idónea: el espacio interplanetario o interestelar, un medio hostil para los humanos, será el terreno óptimo en el que los «cerebros» no biológicos podrían, en un futuro lejano, construir gigantes complejos excavando en lunas y asteroides. Una vez allí, estos intelectos poshumanos desarrollarán conocimientos tan alejados de nuestra imaginación como lo está la teoría de cuerdas para un ratón.

Estas consideraciones tienen efectos transformadores en nuestra percepción de la importancia cósmica de la Tierra. Aun cuando la vida inteligente fuera privativa de la Tierra, no hay que concluir por ello que se trate de una insignificancia en la inmensidad del cosmos. Eso nos puede parecer hoy, pero en los miles de millones de años que quedan por delante las especies poshumanas o las máquinas creadas por ellas tendrán tiempo de sobra para extenderse por toda la galaxia.

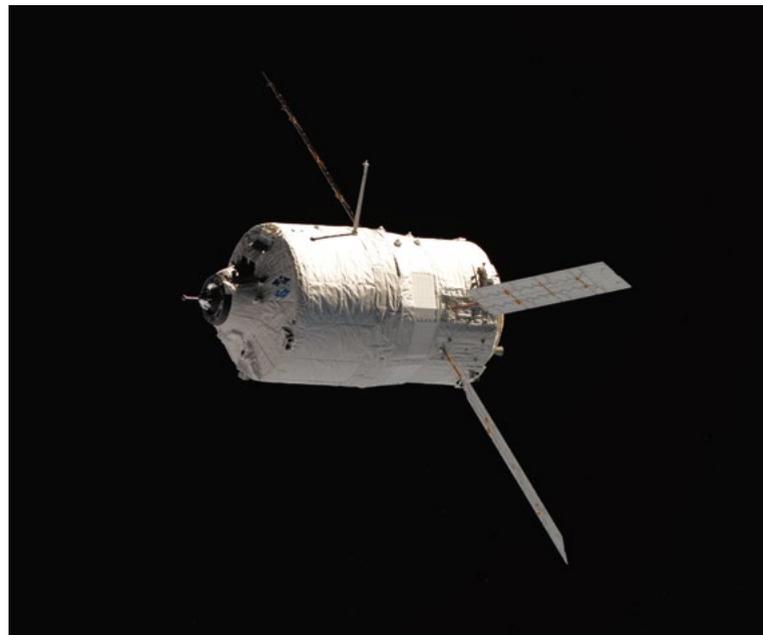
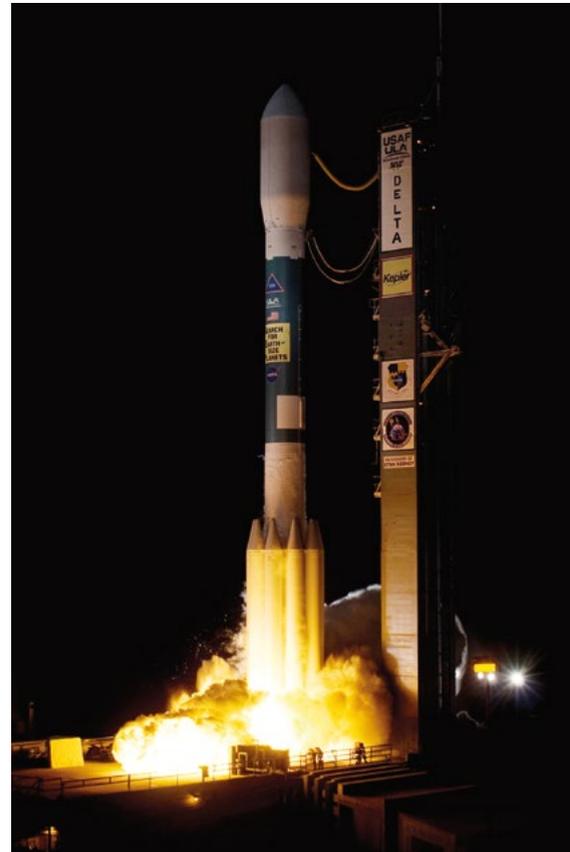
¿Pero somos únicos o ya hay vida inteligente ahí fuera?

¿EXISTE VIDA EXTRATERRESTRE Y CÓMO PODEMOS ENCONTRARLA?

Puede haber organismos simples en Marte, o tal vez fósiles congelados de criaturas que vivieron en el planeta en una fase temprana de este. Y, por supuesto, podría haber también vida flotando en los océanos cubiertos de hielo de Europa, el satélite de Júpiter, o en la luna Encélado de Saturno. Pero pocos apostarían por ello y desde luego nadie espera que exista una biosfera compleja en tales lugares. Por eso tenemos que mirar hacia estrellas más lejanas, fuera del alcance de las sondas que ahora mismo somos capaces de construir. Y aquí las perspectivas son mucho más halagüeñas: hemos sabido que hay, dentro de nuestra Vía Láctea, millones, incluso miles de millones de planetas que recuerdan a la Tierra en su juventud.

En los últimos veinte años, sobre todo en los cinco últimos, el cielo nocturno se ha vuelto mucho más interesante y tentador para los exploradores. Los astrónomos han descubierto que muchas estrellas, tal vez incluso la mayoría, están orbitadas por planetas,





Viajes interestelares y poshumanos

Martin Rees

igual que lo está el Sol. Estos planetas no son detectados directamente, sino que revelan su presencia por los efectos que tienen en su estrella anfitriona y se pueden localizar gracias a mediciones de gran precisión: pequeños movimientos periódicos en la estrella inducidos por la gravedad de un planeta en órbita y atenuaciones leves y recurrentes del brillo de un astro cuando un planeta transita delante de él bloqueando una pequeña fracción de su luz.

El satélite Kepler de la NASA monitorizó el brillo de 150.000 estrellas con suficiente precisión para detectar tránsitos de planetas no mayores que la Tierra. Se sabe que algunas estrellas tienen hasta siete planetas en su órbita, y también que los sistemas planetarios muestran una variedad sorprendente. Es posible que nuestro sistema solar sea cualquier cosa menos típico. En algunos sistemas, planetas tan grandes como Júpiter orbitan tan cerca de sus soles que su «año» dura solo unos días. La cercana estrella Alfa Centauri tiene un planeta del tamaño de la Tierra orbitando tan cerca que su «año» dura cuatro días terrestres. Algunos planetas siguen órbitas excéntricas. Y hay un planeta que tiene cuatro soles en su cielo. Orbita una estrella binaria, que a su vez tiene otra estrella binaria en su órbita: en su cielo hay cuatro «soles». Pero existe un interés especial en encontrar posibles «gemelos» de nuestra Tierra, planetas del mismo tamaño que orbiten estrellas semejantes al Sol, en órbitas con temperaturas en las que el agua ni entre en ebullición ni se congele.

La existencia de estos exoplanetas se ha deducido de manera indirecta, al detectar sus efectos sobre el brillo o el movimiento de las estrellas que orbitan. Sin embargo, nos gustaría ver esos planetas directamente, no solo sus sombras. Y eso es muy difícil. Para hacerse una idea de la dificultad, supongamos que un astrónomo extraterrestre con un potente telescopio estuviera viendo la Tierra a, digamos, 30 años luz, la distancia de una estrella próxima. Nuestro planeta parecería, según la frase de Carl Sagan, un «punto azul pálido», muy próximo a una estrella (nuestro Sol) que es miles de millones de veces más brillante: una luciérnaga junto a una linterna. Pero si los extraterrestres pudieran detectar la Tierra, apreciarían bastantes cosas. La sombra azulada variaría en función de si estuvieran situados frente al océano Pacífico o a la masa terrestre eurasiática. Podrían deducir la duración del «día», las estaciones, si hay océanos, rudimentos de su topografía y su clima. Analizando la débil luz, podrían deducir que la Tierra tiene una biosfera.

Los telescopios con que contamos ahora no nos permiten deducir gran cosa de planetas semejantes a la Tierra, aunque son capaces de determinar la luz de los júpiteres que orbitan estrellas cercanas. Pero todo apunta a que en la próxima década el telescopio espacial James Webb, un telescopio espacial con una lente de 6,5 metros de diámetro cuyo lanzamiento está previsto para 2018, nos dará más información. Mejor aún podría ser la próxima generación de telescopios terrestres gigantes. En un plazo de quince años, el telescopio E-ELT (Telescopio Europeo Extremadamente Grande, un nombre muy poco imaginativo), que se está construyendo en la cima de una montaña en Chile con un espejo primario de 39 metros de ancho, podrá llegar a las mismas conclusiones acerca de planetas del tamaño de nuestra Tierra orbitando otras estrellas semejantes al Sol. (Hay en gestación dos telescopios estadounidenses algo más pequeños.)

¿De verdad esperamos encontrar vida extraterrestre en estos planetas extrasolares? Muchos son «habitables», pero esto no significa que estén poblados, ni siquiera por las formas más primitivas de vida, y mucho menos por algo que pudiera considerarse «avanzado» o «inteligente».



No sabemos cómo empezó la vida en nuestro planeta, sigue siendo un misterio qué provocó la transición de una química compleja a las primeras entidades que se reproducían y metabolizaban y podían considerarse seres «vivos». En esta transición podrían haber intervenido una combinación de circunstancias muy inusual. Por otro lado, algo similar podría haber sucedido en muchas de esas otras «Tierras». Sabemos desde tiempo atrás que el origen de la vida es uno de los grandes enigmas de la ciencia. Pero hasta hace poco se había considerado demasiado complejo y no había atraído a demasiados científicos de alto nivel. Sin embargo, eso ha cambiado. Presiento que los bioquímicos nos darán pistas en una década o dos. Entonces sabremos cómo pudo surgir la vida y dónde investigar. También sabremos si hay algo en la base ADN/ARN específico de la vida terrestre, o si podrían existir criaturas extraterrestres con cuerpos y metabolismos de química muy diferente.

Al considerar las posibilidades de encontrar vida en otra parte, dada nuestra actual ignorancia deberíamos tener la mente abierta acerca de lo que pueda surgir y las formas que podría adoptar. Es importante no perder de vista la posibilidad de que haya vida no semejante a la terrestre en lugares que no se parecen a la Tierra. Pero tiene bastante sentido empezar por lo que sabemos (la estrategia de «buscar bajo la farola») y desplegar todas las técnicas disponibles para descubrir si la atmósfera de algún exoplaneta muestra indicios de una biosfera, o de alguna forma de vida.

Aunque la vida simple fuera común, otra cosa es determinar sus posibilidades de evolucionar hacia algo que pudiéramos reconocer como inteligente, si es que las teorías de Darwin son trasladables a la inmensidad del cosmos. Tal vez el cosmos rebose de vida, o bien nuestra Tierra podría ser única entre los miles de millones de planetas que seguramente existen.

Pero, de haber surgido inteligencia en alguno de estos mundos, podría haberlo hecho antes que en la Tierra (si se dio en un planeta orbitando una estrella más antigua que el Sol) o evolucionado más rápidamente que aquí. En consecuencia, la vida en otra parte podría haber desarrollado ya capacidades que superarían con creces las nuestras.

Estas reflexiones han generado un renovado interés por la búsqueda de indicios de extraterrestres. De hecho, un inversor ruso, Yuri Milner, se ha comprometido a donar 100 millones de dólares en los próximos diez años para impulsar estas investigaciones. Creo que las posibilidades de éxito son, en el mejor de los casos, muy limitadas. Aun así, este descubrimiento sería tan importante, no solo para la ciencia sino para nuestra percepción del lugar que ocupamos en el cosmos, que probablemente merece la pena arriesgarse.

Por supuesto que las conjeturas sobre vida avanzada o inteligente tienen menos fundamento que las que especulan con formas de vida más simples. Las predicciones más sólidas que podemos hacer se basan en lo que sucedió en la Tierra y lo que podría desarrollarse en un futuro remoto a partir de la vida terrestre.

Detectar una «señal» que fuera manifiestamente artificial sería un descubrimiento trascendental: nos indicaría que en algún lugar del cosmos hay entidades poseedoras de inteligencia y tecnología. Si llegara a producirse una detección, ¿qué aspecto tendrían quienes la originaron? En la cultura popular, los extraterrestres suelen representarse con apariencia vagamente humanoide, por lo general bípedos, aunque a veces tienen tentáculos o antenas con ojos en los extremos. Tal vez existan estas criaturas. Pero debo aclarar que ese no es el tipo de inteligencia extraterrestre que deberíamos esperar encontrar.





La cambiante perspectiva sobre el futuro de la vida en la Tierra que acabo de describir es pertinente en toda discusión sobre búsqueda de inteligencia artificial (SETI, por sus siglas en inglés) y sugiere que deberíamos esperar algo muy distinto. Los recientes avances en potencia computacional y robótica han suscitado un interés creciente en la posibilidad de que la inteligencia artificial pueda, en las próximas décadas, alcanzar (y superar) la capacidad humana en una gran variedad de tareas intelectuales y físicas. Esto nos llevará a una mejor comprensión de los mecanismos de aprendizaje, el pensamiento y la creatividad, además de propiciar un debate sobre la naturaleza de la consciencia (¿es una propiedad «emergente» o algo más específico?). También ha promovido fascinantes especulaciones éticas y filosóficas sobre qué formas de inteligencia inorgánica podríamos llegar a crear.

Supongamos que hay muchos otros planetas en los que ha surgido vida y que en alguno de ellos se ha producido una evolución darwiniana similar a la de la Tierra. Aun así, es altamente improbable que las fases clave en ambos hayan ido a la par. Si la aparición de inteligencia y tecnología en un planeta va mucho más retrasada que en la Tierra (porque es un planeta más joven, o porque los «cuellos de botella» hacia la vida compleja, desde la célula a los organismos pluricelulares, por ejemplo, han tardado más en solucionarse allí que aquí), entonces ese planeta no puede tener vida extraterrestre inteligente. Pero en otros planetas, la vida podría haber evolucionado más rápido. Es más, un planeta orbitando una estrella más antigua que el Sol podría habérsenos adelantado en miles de millones de años o más.

La historia de la civilización tecnológica humana se mide en siglos, y puede que en solo unos pocos siglos más los humanos hayan sido superados o trascendidos por una inteligencia inorgánica. Y lo más importante es que esta inteligencia inorgánica podría perdurar y evolucionar a lo largo de miles de millones de años. Estas consideraciones nos sugieren que, si llegáramos a detectar vida extraterrestre, tendríamos muy pocas posibilidades de «captar» dicha inteligencia alienígena en el breve lapso de tiempo en el que aún conserve su forma orgánica. Es mucho más probable que nos haya precedido y haya hecho la transición a formas electrónicas (e inorgánicas) hace ya tiempo.

Por tanto, lo más probable es que una señal extraterrestre no nos llegue de una forma de vida orgánica o biológica. Es decir, no de una «civilización» extraterrestre, sino de cerebros electrónicos inmensamente complejos y potentes. En particular, la costumbre de referirnos a «civilizaciones extraterrestres» puede resultar restrictiva. Una «civilización» implica una sociedad de individuos. Por el contrario, los extraterrestres podrían ser una única inteligencia integrada.

¿Qué implica esto para la búsqueda de inteligencia artificial? Pues que seguramente merezca la pena, a pesar de las probabilidades en contra y lo elevado de la apuesta. Tal vez por eso debamos aplaudir el lanzamiento del proyecto Breakthrough Listen, de Yuri Milner, que llevará a cabo la más profunda y extensa búsqueda en la historia de vida tecnológica extraterrestre usando algunos de los telescopios ópticos y radiotelescopios más grandes del mundo. El proyecto implica dedicar al programa entre el 20% y el 25% de la actividad de dos de las radioantenas direccionales mayores del mundo: la de Green Bank, Virginia Occidental, en Estados Unidos, y la de Parkes, en Australia.

Esperamos que otros instrumentos, como el radiotelescopio de Arecibo (la enorme antena construida en el suelo de Puerto Rico), se unan a la misión. Estos telescopios se utilizarán para buscar transmisiones de radio no naturales procedentes de estrellas cercanas y lejanas, desde el plano de la Vía Láctea, desde el centro galáctico y desde las galaxias cercanas. Buscarán emisiones en banda estrecha que no puedan proceder de ninguna fuente natural cósmica. Buscarán en una amplia frecuencia, de 100 MHz a 50 GHz, usando avanzados equipos de procesamiento de señales desarrollados por un equipo con sede en la Universidad de California, Berkeley.

Este proyecto se basa en una tradición de búsqueda radioastronómica de inteligencia artificial que data de hace cincuenta años. Aunque podría haber indicios en otros anchos de banda, desde luego. Por ejemplo, los impulsos láser serían un buen medio para comunicarse a distancias interestelares. Y los láseres más potentes ofrecen una técnica avanzada capaz de incrementar la velocidad de las naves espaciales. Y además se verían mejor. Pero en el proyecto Breakthrough Listen se usarán también telescopios ópticos.

Las iniciativas de búsqueda de inteligencia artificial buscan transmisiones electromagnéticas, en cualquier banda, que sean manifiestamente artificiales. Pero, aunque la búsqueda tuviera éxito (y muy pocos de nosotros apostaríamos por más del 1% de probabilidades de que esto ocurra), en mi opinión seguiría siendo muy difícil que la «señal» contuviera un mensaje decodificable y dirigido expresamente a nosotros. Lo más probable es que se tratara de un subproducto (o incluso un fallo de funcionamiento) de alguna máquina supercompleja que sobrepase con mucho nuestra comprensión y cuyo origen podría remontarse hasta seres orgánicos extraterrestres. (Estos seres podrían seguir existiendo en sus planetas de origen o podrían haberse extinguido mucho tiempo atrás.)

La única inteligencia cuyos mensajes podríamos decodificar sería la de una (tal vez pequeña) subcategoría que utilizara tecnología compatible con la nuestra. Incluso si las señales fueran intencionadas, podríamos no reconocerlas como artificiales al no saber decodificarlas. Un técnico de radio familiarizado solo con amplitud-modulación podría tener serias dificultades a la hora de decodificar las comunicaciones inalámbricas actuales. De hecho, las técnicas de compresión convierten las señales en algo muy parecido al ruido: en la medida en que una señal





Ensamblaje de los
supermotores del cohete
Delta IV. Un paso más
hacia el primer vuelo
de Orión, en 2018

es predecible, hay más espacio para la comprensión y se ahorra más energía en la transmisión. Así que podemos detectar un mensaje con significado, pero no reconocerlo.

Aunque la inteligencia esté ampliamente repartida por el cosmos, nosotros solo podríamos reconocer una pequeña y atípica fracción de ella. Puede que haya «cerebros» que codifiquen la realidad de modos inconcebibles para nosotros. Otros podrían llevar vidas contemplativas en el fondo de algún océano planetario o flotando libremente en el espacio, sin hacer nada que delate su presencia.

Tal vez la galaxia ya rebosa de vida avanzada y nuestros descendientes se incorporarán a una comunidad galáctica en calidad de «miembros jóvenes». Por otro lado, es posible que nuestra Tierra sea única y las búsquedas no den resultado. Esto desanimaría a los investigadores. Pero tendría su ventaja: los humanos seríamos menos modestos desde el punto de vista cósmico. Nuestro pequeño planeta, este punto azul pálido que flota en el espacio, podría ser el lugar más importante de todo el cosmos. Además estaríamos viviendo un momento único en la historia de la Tierra: nuestra especie tendría trascendencia cósmica por ser precursora en la transición hacia un mundo dominado por las máquinas que se prolongaría en el futuro remoto y se extendería mucho más allá de los confines de la Tierra. Incluso si ahora estamos solos en el universo (lo que desde luego supondría una gran decepción para el programa de búsqueda de inteligencia extraterrestre), no significa que la vida vaya a ser siempre un mero «agente contaminante» en el cosmos. El futuro de nuestro planeta adquiriría una importancia cósmica, y no sería «solo» una fuente de preocupación para los humanos.

Puede que el proyecto Breakthrough Listen no resuelva esta cuestión trascendental, pero nos brinda una pequeña oportunidad de intentarlo, y hay tanto en juego que incluso esa pequeña oportunidad es mucho mejor que nada.

UNA MOTIVACIÓN PARA LOS VIAJES INTERESTELARES

Como ya he subrayado, un viaje interestelar es, inherentemente, de larga duración, y por tanto y en mi opinión, una empresa para poshumanos evolucionados a partir de nuestra especie, no mediante selección natural, sino por diseño. Podrían estar creados a partir de silicio o ser criaturas orgánicas que hubieran ganado la batalla a la muerte o perfeccionado las técnicas de hibernación o animación suspendida. Incluso aquellos que no comparten la idea de la singularidad para mediados de siglo, esperarán un ritmo sostenido, si no acelerado, de innovación en biotecnología, nanotecnología y ciencia informática que lleve a la creación de entidades con intelectos sobrehumanos en unos pocos siglos. Los primeros viajeros a las estrellas no serán humanos, tal vez tampoco orgánicos. Serán criaturas con un ciclo vital ajustado al viaje. Los eones que se tarda en atravesar la galaxia no son disuasorios para seres inmortales.

Antes de abandonar la Tierra, los viajeros deben saber lo que les espera al final del viaje y qué destinos parecen más prometedores. Esta información procederá de estudios en los que se habrán utilizado gigantescos telescopios aún no inventados. Pero sobre todo sabrán si sus lugares de destino están poblados o no, y las sondas robóticas habrán localizado y buscado biosferas o planetas susceptibles de ser «terraformados» y, por tanto, habitables.

Todo esto podría suceder, pero ¿habrá motivación suficiente? ¿Habrá alguien lo bastante intrépido para salir del sistema solar? No podemos predecir qué objetivos inescrutables



impulsarán a los poshumanos. Pero la motivación decaerá seguramente si resulta difícil encontrar biosferas. Los primeros exploradores europeos que se aventuraron a cruzar el Pacífico iban mucho más a ciegas que cualquier explorador del futuro (y se enfrentaban a peligros más temibles). No había expediciones precedentes que permitieran hacer mapas, algo de lo que sí dispondrán los aventureros del espacio. Los viajeros espaciales del futuro siempre podrán comunicarse con la Tierra (aunque con cierto desfase temporal). Si las sondas precursoras revelan que, en efecto, hay maravillas por explorar, existirá un motivo convincente, del mismo modo que al capitán Cook lo motivaron la biodiversidad y belleza de las islas del Pacífico. Pero si no hay más que paisaje baldío, las motivaciones serán puramente expansionistas, en busca de recursos y energía. Y eso es mejor dejarlo en manos de robots.

También resultaría demasiado antropocéntrico limitar el interés a planetas semejantes a la Tierra. Los escritores de ciencia ficción tienen otras ideas: criaturas en forma de globo flotando en las densas atmósferas de planetas similares a Júpiter, enjambres de insectos inteligentes, robots a nanoescala, etcétera. Quizá la vida pueda florecer incluso en un planeta perdido en la oscuridad helada del espacio interestelar, cuya principal fuente de calor proceda de su radioactividad interna (el proceso que calienta el núcleo de la Tierra). Y si existe vida extraterrestre avanzada, lo más probable es que no esté en un planeta, sino flotando en el espacio interestelar. De hecho, puede haber rastro de vida en un planeta una vez que su estrella central, su sol, se apague, cuando se agoten sus reservas de hidrógeno y sus capas exteriores se desprendan. Estas consideraciones nos recuerdan lo efímero de los mundos habitados (y el imperativo vital de liberarse en algún momento de sus ataduras).

Quizá un día encontremos extraterrestres. Por otro lado, la búsqueda de inteligencia artificial puede fracasar. Es posible que la compleja biosfera de la Tierra sea algo único. Pero esto no relega la vida a un papel secundario desde el punto de vista cósmico. La evolución no ha hecho más que empezar. Nuestro sistema solar ha alcanzado aproximadamente la mitad de su ciclo y, si la especie humana consigue no autodestruirse, la era poshumana acabará llegando. Entidades inteligentes, descendientes de la vida en la Tierra, podrían desplegarse por toda la galaxia, evolucionando hacia seres tan complejos que ni tan siquiera podemos concebirlos. De ser así, nuestro pequeño planeta, este punto azul pálido flotando en el espacio, podría ser el lugar más importante de toda la galaxia, y los primeros viajeros interestelares que partan de él tendrán una misión cuyas consecuencias resonarán en toda la galaxia e incluso más allá.

«AVANCE RÁPIDO» HACIA EL FIN DE LOS TIEMPOS

En términos cosmológicos (o, más bien, en un esquema temporal darwiniano), un milenio no es más que un instante. Así pues, vamos a darle a la tecla de *fast forward* y avanzar, no unos siglos, ni siquiera unos milenios, sino millones de veces más que eso, a escala «astronómica». La «ecología» del nacimiento y la muerte de las estrellas en nuestra galaxia se producirá a un ritmo cada vez más lento, hasta dispararse como resultado de la «conmoción ambiental» de una colisión con Andrómeda, tal vez dentro de cuatro mil millones de años. Los restos de nuestra galaxia, Andrómeda y sus compañeras de menor tamaño, que constituirían lo que denominaremos el Grupo Local, se agruparán en una galaxia amorfa.



A medida que se expanda, el universo observable estará más desierto y solitario. Las galaxias lejanas no solo se seguirán alejando, sino que lo harán cada vez más rápido hasta desaparecer, como objetos que se precipitan por un agujero negro y encuentran un horizonte, más allá del cual desaparecen de la vista y del alcance causal.

Pero algunos restos de nuestro Grupo Local podrían durar mucho más, tal vez lo bastante como para que todos los átomos que una vez estuvieron en las estrellas y los gases se transformen en estructuras tan complejas como un organismo vivo o un chip de silicio, pero a escala cósmica.

Aun así, incluso estas especulaciones son, en cierta medida, conservadoras. Yo he supuesto que el universo se expandirá a una velocidad que ninguna entidad futura tendrá el poder de alterar. Y que en principio todo se puede entender como una manifestación de las leyes básicas que gobiernan las partículas, el espacio y el tiempo descubiertas por la ciencia del siglo XXI. Algunos científicos especulativos predicen una ingeniería a escala estelar capaz de crear agujeros negros y agujeros de gusano, conceptos que rebasan cualquier capacidad tecnológica concebible ahora mismo, pero que no entran en contradicción con estas leyes físicas básicas. Sin embargo, ¿hay nuevas «leyes» esperando a ser descubiertas? ¿Serán las «leyes» actuales inmutables incluso para una inteligencia capaz de aprovechar recursos a escala galáctica?

Sabemos muy bien que nuestro conocimiento del espacio y del tiempo es incompleto. La relatividad de Einstein y los principios cuánticos son los dos pilares de la física del siglo XX, pero formular una teoría que las unifique es una tarea pendiente para los físicos del siglo XXI. Las ideas actuales sugieren que hay misterios incluso en la entidad aparentemente más simple, el «mero» espacio vacío. El espacio puede tener una estructura compleja, pero a una escala de un billón de billones de veces más pequeña que un átomo. Según la teoría de cuerdas, cada «punto» de nuestro espacio ordinario, observado a esta escala amplificadas, parecería un origami muy apretado con algunas dimensiones añadidas. Esta teoría quizá explique por qué el espacio vacío puede ejercer el «impulso» que acelera la expansión cósmica, y si ese «impulso» continuará o puede ser revertido. También nos permitirá reconstruir el



verdadero origen, una era de densidades tan extremas en la que fluctuaciones cuánticas pueden sacudir el universo entero, y saber si nuestro Big Bang fue el único.

Las mismas leyes fundamentales sirven para la totalidad del espacio que podemos explorar con nuestros telescopios. Los indicios espectrales sugieren que los átomos de las galaxias más lejanas son idénticos a los estudiados en los laboratorios de la Tierra. Pero lo que hemos llamado tradicionalmente «el universo», la consecuencia de «nuestro» Big Bang, puede no ser más que una isla, un fragmento de espacio de tiempo en un archipiélago tal vez infinito. Pueden haberse producido infinidad de *big bangs*. Todos ellos formarían parte de este *multiverso* que se ha enfriado a ritmos distintos para terminar gobernado por leyes diferentes. Así como la Tierra es un planeta muy especial entre trillones de otros, a una escala muchísimo mayor, nuestro Big Bang fue también muy especial. Vistos desde esta inmensa perspectiva cósmica, las leyes de Einstein y los principios cuánticos podrían parecer modestos reglamentos que gobiernan nuestro trocito de cosmos. El espacio y el tiempo pueden tener una estructura tan intrincada como la fauna de un ecosistema complejo, pero a una escala que queda fuera del alcance de nuestra capacidad de observación actual. Nuestro actual concepto de realidad física podría ser tan limitado en relación al todo como la perspectiva que tuviera de la Tierra un plancton cuyo «universo» cabe en una cucharada de agua.

Y eso no es todo. Falta el final inesperado. La inteligencia poshumana (en forma orgánica o de artefactos que evolucionan autónomamente) desarrollará hiperordenadores con una potencia de procesamiento capaz de simular seres vivos, incluso mundos enteros. Tal vez seres avanzados puedan aprovecharlo y superar con creces los mejores «efectos especiales» de las películas o de los juegos de ordenador hasta el punto de replicar la totalidad de un universo tan complejo como el que creemos habitar. Puede que ya existan superinteligencias de este en algún lugar del *multiverso*, en universos más antiguos que el nuestro, o más idóneos. ¿Qué harían estas superinteligencias con sus hiperordenadores? Podrían crear universos virtuales en número muy superior a los «reales». Así que tal vez seamos «vida artificial» en un universo virtual. Este concepto abre la posibilidad de un nuevo tipo de «viaje virtual en el tiempo», porque los seres avanzados que creen la simulación podrían, en efecto, recrear el pasado. No se trata de un bucle temporal en el sentido tradicional, sino una reconstrucción del pasado que permitiría a seres avanzados explorar su historia.

Posibilidades que en su día pertenecían al campo de la ciencia ficción suscitan hoy un debate científico serio. Desde los primeros momentos del Big Bang hasta las vertiginosas posibilidades de vida extraterrestre, universos paralelos y más cosas, los científicos se han desplazado hasta mundos más extraños aún que los concebidos en el terreno de la ficción. Intuimos lazos más profundos entre la vida, la consciencia y la realidad física. Llama la atención que nuestros cerebros, que han cambiado poco desde que nuestros antepasados merodeaban por la sabana africana, nos hayan permitido entender los mundos abstractos de la cuántica y el cosmos. Pero nuestra capacidad de comprensión no significa que vayamos a tener todas las claves de la realidad. Las fronteras de la ciencia avanzan deprisa, pero habrá parones. Algunos de estos nuevos conocimientos tal vez tengan que esperar a la inteligencia poshumana. Puede haber fenómenos cruciales para el destino de la vida a largo plazo, de los que somos tan conscientes como lo es un simio de la naturaleza de las estrellas y las galaxias.

Si nuestros descendientes de un futuro lejano llegan a las estrellas, seguramente no solo nos habrán superado en longevidad, también en conocimientos y tecnología.



«Hágase una demostración práctica del arte de volar y no faltarán en nuestra especie, la humana, colonizadores (de la Luna, de Júpiter). Provéanse navíos o velas adaptadas a las brisas celestiales y habrá quienes no teman siquiera ese vacío [...] Así que para aquellos que no tardarán en intentar ese viaje, establezcamos la astronomía: de Júpiter tú, Galileo, yo de la Luna.»

JOHANNES KEPLER (1571-1630)

Astrónomo y matemático alemán, en una carta a Galileo Galilei fechada el 19 de abril de 1610

Plutón y Caronte, el mayor de todos los satélites del sistema solar en comparación con su planeta. La imagen fue captada por la sonda New Horizons de la NASA en su sobrevuelo al planeta enano en julio de 2015



Edición

BBVA

Dirección y coordinación del proyecto

Adjunto al Presidente BBVA

Textos

Jay David Bolter
María Engberg
Luciano Floridi
James Giordano
Francisco González
Aubrey D. N. J. de Grey
Robin Hanson
S. Matthew Liao
Steven Monroe Lipkin
Ramón López de Mántaras
Seán Ó hÉigeartaigh
Helen Papagiannis
Joseph A. Paradiso
Martin Rees
Jonathan Rossiter
Stuart Russell
Huma Shah
Chris Skinner
Kevin Warwick
Darrell M. West

Edición y producción

Turner

Coordinación editorial

Nuria Martínez Deaño

Diseño gráfico y maquetación

Gema Navarro
wearerifle.com
Pablo Sorez
underbau.com

Traducción

Sebastián Durán
José Ventura López
Laura Vidal

Documentación

María Luisa Fruns

Corrección de textos

Gloria Díaz Llorente
Carlos Miranda de las Heras

Impresión

Artes Gráficas Palermo

Encuadernación

Ramos

Imágenes

Imagen de cubierta:
Shutterstock/Filip Warulik

Alamy Stock Photo/ AF Archivo:
pp. 274 (arriba dcha.), 275, 374
(arriba dcha., abajo izq. y abajo
dcha.), 148 (abajo dcha.) | Alamy
Stock Photo/Moviestore collection
Ltd.: pp. 148 (arriba izq. y abajo izq.),
274 (abajo izq.) | Alamy Stock Photo/
Photos 12: pp. 186, 187 (arriba dcha.)
| Alamy Stock Photo/ScreenProd/
Photononstop: pp. 89, 91 (arriba
dcha. y abajo izq.), 149 | Alamy
Stock Photo/Collection Christophel:
p. 187 (arriba izq. y abajo izq.) | Alamy
Stock Photo/Pictorial Press Ltd.:
p. 187 (abajo dcha.) | Alamy Stock
Photo/Ronald Grant Archivo: p. 274
(arriba izq.) | Alamy Stock Photo/
United Archivos GmbH: p. 274 (abajo
dcha.) | Album/INDIGO FILM: pp.
16-17 | Album/Ladd Company/Warner
Bros: pp. 90, 91 (arriba izq. y abajo
dcha.) | Album/20TH CENTURY FOX:
p. 148 (arriba dcha.) | Album/2929
PRODUCTIONS: pp. 374 (arriba izq.),
375 | Album/M.G.M: pp. 386, 387 |
Artem Dementyev: p. 53 | Iwan
Baan: p. 162 | Amir Baradaran: p. 142 |
Jean-Gilles Berizzi: p. 249 (arriba
dcha.) | Jay David Bolter: p. 154 (abajo
izq.) | Alan Brandt: pp. 258-259 |
Bridgeman Images: pp. 126, 242 |
Contacto/Magnum Photos/Stuart
Franklin: p. 230 | Simon Colton:
p. 118 | Cortesía de University of
Illinois, Urbana-Champaign Archives:
p. 107 | Cortesía de Rob Felt, Georgia
Tech: p. 28 | DEA/G. DAGLI ORTI:
p. 249 (abajo dcha. y abajo izq.) |
Don Derek Haddad: p. 68 | ESA/
NASA: p. 393 (abajo dcha.) | Agustín
Estrada/ Cortesía de Eduardo
Terrazas, Proyectos Monclova:
p. 216 | Getty Images/Andia: p. 286 |
Getty Images/Kim Badawi : p. 337
| Getty Images/Bettmann: p. 253 |
Getty Images/Adam Berry: p. 349 |
Getty Images/Tim Boyle: p. 25 |
Getty Images/Rodrigo Buendía:
p. 320 | Getty Images/Yasuyoshi
Chiba: p. 294 | Getty Images/
Reinhard Dirscherl: p. 36 (abajo) |
Getty Images/Jim Dyson/Redferns:
p. 178 | Getty Images/Sean Gallup:
p. 196 | Getty Images/Johnny Greig:
pp. 306-307 | Getty Images/Olivia
Harris: p. 154 (abajo dcha.) | Getty
Images/Stephen Jaffe: pp. 342-343
| Getty Images/Lou Jones: p. 46 |
Getty Images/Wolfgang Kaehler: p.
359 (arriba dcha. y arriba izq.) | Getty
Images/Mondadori Portfolio p. 8 |
Getty Images/Kazuhiro Nogi: pp. 202-
203 | Getty Images/David McNew:
p. 280 | Getty Images/Robert
Nickelsberg: p. 291 | Getty Images/

Mark Ralston: p. 359 (abajo) | Getty
Images/Andreas Solaro: p. 366 | Getty
Images/Chip Somodevilla:
p. 192 | Getty Images/AFP/Yoshikazu
Tsuno: p. 43 | Getty Images/William
West: p. 154 (arriba) | Hulton Archive/
Getty Images: p.133 | Instituto Cajal:
p. 313 | Chris Jordan: p. 352 | Golan
Levin y colaboradores: p. 139 |
Michael Mapes: p. 264 | Ryuichi
Maruo: pp. 114-115 | Ryuichi Maruo/
Cortesía del Yamaguchi Center of
Arts Media (YCAM): p. 59 | Philippe
Migeat: p. 100 | Miscellaneous.com:
pp. 222-223 | Nasa/Charles Babir: pp.
156-157 | NASA/Ben Smegelsky:
pp. 398-399 | NASA/cxc/sao/jpl:
p. 380 | NASA/Jhuapl/SwRI: p. 405
| NASA/JPL-Caltech/Ball Aerospace:
p. 393 (abajo izq.) | NASA/Kim
Shiflett: p. 393 (arriba dcha.) | NASA:
p. 393 (arriba izq.) | Thierry Ollivier: p.
249 (arriba izq.) | Phototake/ISM:
p. 20 (arriba dcha.) | Phototake/
LookatSciences: p. 20 (abajo izq.)
| Science Photo Library/Eye Of
Science: p. 36 (arriba dcha.) | Science
Photo Library/Steve Gschmeissner:
p. 36 (arriba izq.) | Science Photo
Library/ Silvia Riccardi: p. 300 | Trunk
Archive/Christian Webber: pp. 2-3 |
Vankad: p. 76 | Wolfgang Volz: p. 209 |
Wellcome Images/Dr David Becker:
p. 270 (arriba izq.) | Wellcome Images/
Annie Cavanagh: p. 270 (abajo izq.) |
Wellcome Images/David Gregory y
Debbie Marshall: p. 20 (abajo dcha.)
| Wellcome Images/S. Gschmeissner,
K. Hodivala-Dilke y M. Stone: p. 270
(abajo dcha.) | Wellcome Images/
Anne Weston: p. 270 (arriba dcha.)
| Wellcome Images/Rob Young:
p. 20 (arriba izq.) | Wonderlane: p. 173

© Christo, 2016 | © Zaha Hadid
Architects | © Hannah Höch, VEGAP,
Madrid, 2016 | © Ryoji Ikeda |
© Kraftwerk | © Rafael Lozano-
Hemmer, VEGAP, Madrid, 2016 |
© Georges Méliès, VEGAP, Madrid,
2016 | © Ron Mueck | © Martial
Raysse, VEGAP, Madrid, 2016 |
© Devorah Sperber | © The Andy
Warhol Foundation for the Visual Arts,
Inc. VEGAP, Madrid, 2016

© de la edición, BBVA, 2016
© de los textos, sus autores, 2016
© de la traducción, sus autores, 2016

ISBN: 978-84-16714-44-5
DL: M-39736-2016

Impreso en España

OTROS LIBROS DE BBVA OPENMIND

2016

La búsqueda de Europa: visiones en contraste

Este libro tiene como objetivo el análisis y la generación de debate sobre el presente y el futuro de Europa y de su proyecto de integración. La integración europea es un tema que afecta no solamente a los europeos sino a todos los ciudadanos del mundo. Europa, en su conjunto, es en la actualidad la primera potencia económica y comercial mundial y representa además el proyecto de integración económica y política más ambicioso de la historia. De ahí que tanto sus logros como sus fracasos puedan tener efectos a nivel global.

2015

Reinventar la empresa en la era digital

La era digital ha desatado un vasto *tsunami* que todavía estamos intentando comprender y asimilar. Las reglas del juego para hacer negocios cambian casi a diario y es difícil adaptarse a un entorno vertiginoso y en constante transformación. Esto ha tenido enormes repercusiones en el entorno laboral, sobre todo en los llamados «sectores tradicionales». Para tener éxito en esta nueva gran era, las grandes organizaciones que durante décadas han sido rentables y líderes en su sector necesitan cambiar radicalmente.

2014

C@mbio: 19 ensayos clave acerca de cómo internet está cambiando nuestras vidas

Internet, como herramienta accesible para un público razonablemente amplio, no tiene más que dos décadas, y ya es el catalizador fundamental de la revolución tecnológica más amplia y acelerada de la historia. La más amplia, porque sus efectos, en estas dos décadas, han alcanzado prácticamente a todos los ciudadanos del mundo. Y la más acelerada porque su adopción masiva está siendo más rápida que ninguna anterior. Hoy es imposible imaginar un mundo sin internet; nos permite hacer cosas que hace unos pocos años hubiéramos considerado impensables.

2013

Hay futuro: visiones para un mundo mejor

Con este libro se busca integrar los distintos elementos en la difusión del conocimiento: ¿cómo interaccionan entre sí?, ¿hacia dónde nos están llevando? Y, lo que es aún más importante, ¿qué se puede hacer para que esa trayectoria, entre los riesgos que se advierten, mejore las condiciones de vida de las personas de forma sostenible? El futuro parece que iba a llegar a toda velocidad. Precisamente por eso, si anticipar el futuro hoy es particularmente difícil, prepararse para él también es particularmente importante y urgente.

2012

Valores y ética para el siglo XXI

El tema central de este libro es la ética y los valores, pues se necesitan unos valores y una ética compartidos para el funcionamiento adecuado del entramado económico, político y social, y por tanto, para el bienestar y el desarrollo de todas las posibilidades de cada ciudadano del mundo. La intención de este libro es difundir cómo podemos entender y utilizar los principios éticos universales para afrontar los grandes desafíos que nos plantea el siglo XXI.

2011

Innovación. Perspectivas para el siglo XXI

La relevancia decisiva de la innovación es el principal factor capaz de impulsar el crecimiento económico y la mejora de los estándares de vida de las personas a largo plazo. Así ha sido a lo largo de la historia, pero en nuestra época se abren posibilidades infinitas para la innovación, en paralelo al acelerado progreso científico y tecnológico. La innovación se hace hoy más necesaria que nunca para afrontar los grandes retos de la especie humana: la desigualdad y la pobreza, la educación y la salud, el cambio climático y el medio ambiente.

2010

Las múltiples caras de la globalización

El libro presenta una panorámica de la globalización, un fenómeno muy complejo y controvertido, característico de la sociedad de nuestro tiempo y decisivo en la vida diaria de todos los ciudadanos del mundo a principios del siglo XXI. Para ello, se ha buscado a los mejores investigadores y creadores a nivel internacional para que pongan a nuestro alcance los avances del conocimiento y los argumentos del debate que perpetuamente tiene lugar en la frontera de la ciencia.

2009

Fronteras del conocimiento

Prestigiosos investigadores de todo el mundo, que trabajan en la «frontera del conocimiento», resumen lo más esencial de lo que hoy conocemos, y de lo que aspiramos a conocer en el futuro próximo en los campos de la física, la biomedicina, las tecnologías de la información y las telecomunicaciones, la ecología y el cambio climático, la economía, la empresa y el desarrollo, y analizan el papel de la ciencia y de las artes en nuestra sociedad y en nuestra cultura.

CANAL OPENMIND



OTROS LIBROS

